

Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stephan Lange
aus Gifhorn

und

Dipl.-Ing. Michell Schimanski
aus Bremerhaven

eingereicht am: 18.10.2006

mündliche Prüfung am: 15.12.2006

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jörn-Uwe Varchmin

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker

2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen unserer Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Das Projekt wurde von der Volkswagen AG im Rahmen einer Kooperation unterstützt und gefördert. Die Arbeit wurde als Gemeinschaftsdissertation verfasst, wobei die Anteile der Autoren durch (L) bzw. (S) gekennzeichnet sind.

Unser besonderer Dank gilt unserem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn-Uwe Varchmin, der uns bei unserer Arbeit stets fachlich und gerade in schwierigen Situationen auch moralisch unterstützt hat. Das uns von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die optimalen Arbeitsbedingungen am Institut ermöglichten uns eine sehr erfolgreiche und selbstständige Arbeitsweise.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Bäker und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolf Rüdiger Canders bedanken wir uns für die Übernahme der Mitberichterstattung bzw. des Prüfungsvorsitzes. Ihr Engagement hat die sehr zügige Durchführung des Prüfungsverfahrens ermöglicht.

Weiterhin danken wir allen am Projekt Beteiligten, die durch ihre tatkräftige Hilfe zum Gelingen des Projektes beigetragen haben. Insbesondere möchten wir das Engagement der Studierenden, die im Rahmen des Projektes ihre Studien- oder Diplomarbeiten durchführen konnten, an dieser Stelle hervorheben.

Schließlich gilt ein herzlicher Dank unseren Familien, Freunden und Arbeitskollegen, die uns in der Zeit der Promotion hilfreich zur Seite standen und stets für den nötigen Ausgleich gesorgt haben.

Kurzfassung

Die Automobilindustrie wird in den nächsten Jahren mit vielen Herausforderungen wie zum Beispiel strengeren Abgasnormen und steigenden Ölpreisen konfrontiert. Um sich den Herausforderungen zu stellen, werden zurzeit Fahrzeuge mit alternativen Antrieben entwickelt und auf dem Markt platziert. Um weiterhin einen sicheren und effizienten Betrieb der elektrischen Komponenten zu gewährleisten, ist die Einführung eines ganzheitlichen Energiemanagements notwendig. Es umfasst dabei alle planenden, steuernden und vorausschauenden Maßnahmen.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein neuartiges Systemkonzept vorgestellt, das mittels interner Fahrzeuginformationen online eine Prognose vorausliegender Fahrsituationen wie z.B. Geschwindigkeits- und Höhenprofile vornehmen kann. Darauf aufbauend kann die Betriebsstrategie den zukünftigen Leistungs- bzw. Energiebedarf des Fahrzeugs berechnen und Steuerbefehle einleiten, um einen effizienteren Fahrbetrieb zu ermöglichen. Die Grundlage dieses Systemkonzeptes ist die Erkennung von Fahrstrecken anhand charakteristischer Lenkradwinkelinformationen und das Anlegen einer Historiendatenbank für die gefahrenen Strecken mit den jeweiligen Geschwindigkeits- und Höhenprofilen.

Ausgehend von einer umfassenden Bordnetzanalyse werden im zweiten Teil der Arbeit verschiedene Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess für die Dimensionierung der Bordnetzenergieversorgung diskutiert. Hieraus resultiert die Notwendigkeit, eine Toolkette zu entwickeln, welche auf Simulationen basiert. Diese besteht aus kommerziellen Simulationstools und der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software Avanti (Advanced Analysis Tool and Simulation Interface). Avanti ermöglicht eine automatisierte und optimale Vorgehensweise bei der Dimensionierung unter Berücksichtigung verschiedener Steuerungsalgorithmen. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Toolkette ist dabei die Einbindung einer in VHDL-AMS entwickelten und verifizierten Modellbibliothek für die Bordnetzkomponenten.

Abstract

Within the next few years, the automotive industry will be confronted with many challenges, as for example stricter emission standards and increasing oil prices. To meet the challenges, alternative drive concepts are currently being developed and placed in the market. To ensure a secure and efficient operation of the electric components, the introduction of an integrated energy management is required. It comprises all planning, controlling and predictive measures.

The first part of this dissertation presents a new system concept, which can make an online prognosis of expected driving situations, such as speed and altitude profiles by means of internal vehicle information during an operating cycle. Based on this the control strategy can calculate the future power requirement of the vehicle and initiate control commands to enable a more efficient driving. The basis of this system concept is the recognition of routes with characteristic steering angle information and the creation of a history database for the routes driven with the respective vehicle speeds and altitudes.

On the basis of an extensive analysis of the vehicle's electrical system in the second part of the dissertation, different effects on the development process for dimensioning the electrical system power supply are discussed. From this follows the necessity to develop a tool chain based on simulations. The tool chain consists of commercial simulation tools and the software Avanti (Advanced Analysis Tool and Simulation Interface) which is developed within the scope of the dissertation. Avanti enables an automated and optimal procedure when dimensioning the vehicle's electrical system in consideration of different control algorithms. A substantial part of this tool chain is the integration of a verified VHDL-AMS model library for the electrical system components.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung (L/S)	1
1.1	Herausforderung für die Automobilindustrie (S)	1
1.1.1	Fossile Ressourcen	1
1.1.2	Gesetze und Förderprogramme	3
1.1.3	Kundenwünsche und Marktsituation	5
1.2	Ganzheitliches Energiemanagement (L)	7
1.3	Ziele der Arbeit (L/S)	9
1.4	Übersicht der Arbeit (L/S)	10
2	Fahrzeuge mit hybriden Antriebssystemen (L/S)	13
2.1	Hybridstrukturen (L)	13
2.1.1	Serieller Hybridantrieb	13
2.1.2	Paralleler Hybridantrieb	14
2.1.3	Leistungsverzweigter Hybridantrieb	14
2.2	Grad der Hybridisierung (L)	16
2.3	Antriebskomponenten (S)	17
2.3.1	Verbrennungskraftmaschinen	17
2.3.2	Elektromotor	18
2.3.3	Speicher	18
2.3.4	Getriebe	20
2.4	Betriebsstrategie (L)	21
2.5	Schlussbetrachtung (L)	24
3	Prognose als Basis für die Betriebsstrategie (L)	27
3.1	Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme	28
3.1.1	Navigationssystem	28
3.1.2	Adaptive Cruise Control	29
3.1.3	Verkehrszeichenerkennung	29
3.1.4	Car to Car Communication	29
3.1.5	Bewertung	30
3.2	Fahrstreckenerkennung	31
3.2.1	Konzept	31
3.2.2	Aufnahme von Messdaten	33
3.2.3	Digitale Signalanalyse	34

3.2.4	Mustererkennung	36
3.2.5	Geschwindigkeitsprognose	43
3.2.6	Historiendatenbank	47
3.2.7	Rechen- und Speicheraufwand	51
3.2.8	Fazit	54
3.3	Bewertung des Prognosenutzens mittels Fahrstreckenerkennung . . .	55
3.3.1	Abstraktes Fahrzeugmodell	55
3.3.2	Bremskraftverteilung, Getriebe und Elektromotor	57
3.3.3	Betriebsstrategie	59
3.3.4	Ergebnisse	64
3.4	Fazit	66
4	Bordnetzanalyse (L)	69
4.1	Aufbau des elektronischen Fahrzeugsystems	69
4.1.1	Spannungsversorgung	69
4.1.2	Funktionserzeugung	70
4.1.3	Kommunikation	73
4.1.4	Sensorik	76
4.1.5	Aktuatorik	77
4.1.6	Ansteuerung	82
4.2	Energieversorgung des Bordnetzes	85
4.2.1	Energiewandler	85
4.2.2	Energieumsetzer	88
4.2.3	Energiespeicher	89
4.2.4	Energieverteilung	91
4.3	Untersuchung und Bewertung der elektrischen Bordnetzleistung . . .	91
4.3.1	Installierte elektrische Leistung	92
4.3.2	Betriebsphasen	97
4.4	Schlussfolgerungen	111
5	Modellbildung und Simulation (S)	113
5.1	Grundlagen der technischen Simulation	113
5.1.1	Was ist ein System?	114
5.1.2	Was ist ein Modell?	116
5.1.3	Digitale Simulation	117
5.1.4	Modellierungsverfahren und Tools	122
5.1.5	Bestehende Modelle	126
5.1.6	Methodik zur Auswahl relevanter Komponenten	127
5.1.7	Festlegung der benötigten Modellgüte	129
5.2	Komponentenmodellierung	130
5.2.1	Grundlagen der Modellierung	130
5.2.2	Energieversorgungskomponenten	133

5.2.3	Elektromotoren	138
5.2.4	Heizsysteme	141
5.2.5	Sonstige Verbraucher	146
5.2.6	Umfang der Modellbibliothek	147
5.3	Modellverifizierung	147
5.3.1	Verifizierung der Komponentenmodelle	147
5.3.2	Verifizierung des Gesamtmodells	151
5.4	Fazit	154
6	Dimensionierungsmethodik für die Kfz-Bordnetzversorgung (L/S)	155
6.1	Methodik (L)	156
6.2	Optimierung (L)	156
6.2.1	Metropolis-Algorithmus	158
6.2.2	Randbedingungen	160
6.2.3	Betriebsszenarien	162
6.2.4	Fazit	164
6.3	Steuerungsalgorithmen für das Kfz-Bordnetz (L)	165
6.3.1	Batteriediagnose	165
6.3.2	Ruhestrommanagement	169
6.3.3	Dynamisches Lastmanagement	170
6.3.4	PWM-Scheduling	172
6.4	Toolkette Avanti (S)	182
6.4.1	Motivation	182
6.4.2	Energienetzsimulation	184
6.4.3	Generierung von Netzmodellen	188
6.4.4	Generierung von Szenarien	194
6.4.5	Randbedingungen	197
6.4.6	Simulation mit Avanti	201
6.4.7	Analyse von Simulationsergebnissen	202
6.4.8	Automatische Parametervariation	210
6.4.9	Optimierung	211
6.4.10	Ausgabe eines elektronischen Lastenheftes	215
6.5	Auswirkungen des PWM-Scheduling auf die Bordnetzenergieversorgung (L)	218
7	Zusammenfassung und Ausblick (L/S)	223
	Literaturverzeichnis	227
	Veröffentlichungen	237

Tabellenverzeichnis

1.1	Abgasgrenzwerte [g/km] für PKW mit Otto-Motor in Europa	3
1.2	Abgasgrenzwerte [g/km] für PKW mit Diesel-Motor in Europa	3
1.3	Gesetzliche Vorschriften für Rückhaltesysteme und die daraus resul- tierende Massenzunahme(vgl. [58])	5
2.1	Übersicht aktueller Hybridfahrzeuge	17
2.2	Bewertung ausgewählter Optimierungsverfahren hinsichtlich relevan- ter Kriterien für die Betriebsstrategie	23
3.1	Vektor mit quantisierten Geschwindigkeiten für die Prognose	45
3.2	Matrixstruktur der Historiendatenbank	48
3.3	Streckenbeschreibung der Szenarien 1 und 2	49
3.4	Abfolge der Szenarien 1 und 2	50
3.5	Einträge in der Historiendatenbank nach 20 Fahrten beim Szenario 1 .	52
3.6	Einträge in der Historiendatenbank nach 30 Fahrten beim Szenario 1 .	52
3.7	Einträge in der Historiendatenbank nach 16 Fahrten beim Szenario 2 .	53
3.8	Einträge in der Historiendatenbank nach 23 Fahrten beim Szenario 2 .	53
3.9	Auszug aus der kombinatorischen Logik	63
3.10	Ausgewählte Geschwindigkeitsprofile für die Bewertung des Progno- senutzens	65
3.11	Physikalische Fahrzeugparameter	65
4.1	Übersicht der im Fahrzeug verbauten Sensorarten	77
4.2	Einteilung der Komponenten in Abhängigkeit von der Leistung und der Funktion	93
4.3	Technische Daten der Multi-Sensor-Einsteckkarte TDS E1591A Opt 011	100
4.4	Technische Daten der Strommesszange PR200 der Firma LEM	101
4.5	Betriebsszenarien bei den Messfahrten	102
4.6	Mittlere Bordnetzleistungen des Elektrofahrzeugs	102
4.7	Maximale Bordnetzleistungen des Elektrofahrzeugs während des Fahrbetriebs	103
4.8	Auswirkungen verschiedener Fahrer auf das Betriebsverhalten der Unterdruckpumpe	106

4.9	Auswirkungen verschiedener Fahrer auf das Betriebsverhalten der elektromechanischen Lenkung	108
4.10	Benötigte Ladungsmengen für Vor- und Nachlaufbetrieb in Abhängigkeit von der Motorisierung und dem Ausstattungsgrad	109
5.1	Definition der Detaillierungsgrade	129
5.2	Analogie zwischen Elektrik und Mechanik	139
5.3	Analogie zwischen Elektrik und Thermodynamik	143
5.4	Übersicht der Komponentenmodelle	148
5.5	Auswertung der Messfahrt im Stadtzyklus bei 27 °C	152
5.6	Auswertung der Messfahrten im Stadtzyklus bei 7 °C	153
6.1	Übersicht der Betriebsszenarien für die Auslegung der Bordnetzenergieversorgung	164
6.2	Verbaute Komponenten im Labormuster	179
6.3	Tastverhältnisse für verschiedene Temperaturbereiche	180
6.4	Messergebnisse des Labormusters für die einzelnen Szenarien mit und ohne PWM-Scheduling	182
6.5	Komponententypen	189
6.6	Parameter für die Berechnung der Batteriezyklisierung	208
6.7	Kälteprüfstrom in Abhängigkeit von der Batteriequalität	209

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung der Kraftstoffpreise in Deutschland bezogen auf den Preisindex [84][3]	2
1.2	Entwicklung des VW Golf (Basisausstattung)	6
1.3	Deming-Kreislauf als Grundlage eines Energiemanagements	8
2.1	Serielle Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs	14
2.2	Parallele Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs	15
2.3	Leistungsverzweigte Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs	15
2.4	Antriebsfunktionen in Abhängigkeit vom Hybridisierungsgrad	16
2.5	Unterschiedliche Regelkennlinien eines Verbrennungsmotors für die Optimierungskriterien Verbrauch, Geräusch und Fahrdynamik	22
3.1	Meilensteine der Car to Car Communication	30
3.2	Wege Zwecke in Deutschland	32
3.3	Systemkonzept der Fahrstreckenerkennung und Prognose für die Betriebsstrategie	32
3.4	Lenkradwinkelverläufe zweier Fahrten auf derselben Strecke	33
3.5	Korrelation zweier verschobener Lenkradwinkelsignale auf derselben Strecke	35
3.6	Charakteristische Merkmale des Lenkradwinkelsignals über einen Fahrzyklus	37
3.7	Approximation des realen Lenkwinkelsignals	38
3.8	Approximierte und extrahierte Lenkradwinkelsignale zweier Fahrten auf derselben Strecke	40
3.9	Ablaufdiagramm des Erkennungsalgorithmus	41
3.10	Geschwindigkeitsverlauf einer Stadtfahrt	43
3.11	Quantisierung des realen Geschwindigkeitsverlaufs	44
3.12	Prognostizierter quantisierter Geschwindigkeitsverlauf und vorhergesagte Geschwindigkeitsgradienten	46
3.13	Bestandteile des abstrakten Fahrzeugmodells	56
3.14	Fahrwiderstände an einem Fahrzeug	56
3.15	SOC-Verlauf ohne Nutzung der Prognoseinformationen	60
3.16	Detailliertes Systemkonzept der Betriebsstrategie mit Nutzung der Prognoseinformationen	62

4.1	Grundelemente eines elektronischen Fahrzeugsystems	70
4.2	Spannungsversorgung der Kfz-Elektronik	71
4.3	Entwicklung des Softwareumfangs im Kfz [20]	72
4.4	Aufbau eines Mikrocontrollers	73
4.5	Auszug einer Fahrzeugvernetzung	74
4.6	Anteile der verbauten Aktoren an der installierten Bordnetzleistung .	78
4.7	Schaltungsaufbau eines Π -Filters	83
4.8	Aktorenansteuerung über einen Low- und High-Side-Schalter	84
4.9	Stromabgabe eines 100A Klauenpolgenerators in Abhängigkeit von der Drehzahl	86
4.10	Installierte Leistung im Funktionsbereich Antrieb in Abhängigkeit von der Motorisierung konventioneller Antriebe	94
4.11	Installierte Leistung im Funktionsbereich Antrieb in Abhängigkeit von verschiedenen Antriebskonzepten	96
4.12	Installierte Leistung in den Funktionsbereichen Sicherheit, Komfort und Infotainment in Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad	97
4.13	Betriebsphasen eines Fahrzeugs	98
4.14	Messaufbau für die Vermessung der Bordnetzleistung im Fahrzeug . .	99
4.15	Stromaufnahme der Unterdruckpumpe bei einer Stadtfahrt	104
4.16	Stromverhalten der Unterdruckpumpe beim Einschalten	105
4.17	Stromverhalten der elektromechanischen Lenkung bei einer Stadtfahrt	107
4.18	Stromverhalten der elektromechanischen Lenkung beim Einschalten .	108
4.19	Ruhestrom in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse	110
5.1	V-Modell ohne den Einsatz von Simulationen	114
5.2	V-Modell mit Einsatz von Simulationen	114
5.3	Schematische Darstellung eines Systems (vgl. [41])	115
5.4	Linearisierung eines Signals	118
5.5	Integration nach der Trapezregel	118
5.6	Unterschied zwischen analoger und digitaler Simulation	120
5.7	Schrittweitenwahl	121
5.8	Beispiel einer algebraischen Schleife	122
5.9	Kriterien für die Einbindung in ein passives Energiemanagement . . .	128
5.10	Kriterien für die Einbindung in ein aktives Energiemanagement	128
5.11	Einfaches Ersatzschaltbild für einen DC/DC-Wandler	134
5.12	Gemessenes Wirkungsgradkennfeld eines Bordnetzwandlers	135
5.13	Ersatzschaltbild für einen Tiefsetzsteller	136
5.14	Simulierte Strom- und Spannungsverläufe beim Kennlinienmodell (nach Abbildung 5.11)	137
5.15	Simulierte Strom- und Spannungsverläufe beim Strukturmodell (nach Abbildung 5.13)	137
5.16	Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Batterie	138

5.17	Ersatzschaltbild eines DC-Motors (elektrisch und mechanisch)	139
5.18	Signalflussmodell der Unterdruckpumpe	141
5.19	Signale des Modells der Unterdruckpumpe	142
5.20	Thermisches Ersatzschaltbild des Fahrzeugs	143
5.21	Thermisches Ersatzschaltbild einer Insasse	144
5.22	Ersatzschaltbild einer Scheibenheizung (elektrisch und thermisch) . .	145
5.23	Ersatzschaltbild einer Sitzheizung (elektrisch und thermisch)	146
5.24	Ersatzschaltbild für einen ohmschen Verbraucher	146
5.25	Temperaturverlauf der Sitzheizung bei voller Heizleistung (Simulation, Messung und relativer Fehler)	149
5.26	Stromaufnahme der Unterdruckpumpe im ECE-Zyklus (oben Messung, unten Simulation)	150
5.27	Bordnetzleistung im Stadtzyklus bei 27 °C (oben Messung, unten Simulation)	151
5.28	Bordnetzleistung im Stadtzyklus bei 7 °C (oben Messung, unten Simulation)	153
6.1	Allgemeine Methodik für die Dimensionierung der Energieversorgung des Bordnetzes	157
6.2	Exemplarische Gütefunktion für die Bestimmung der optimalen Parameter eines DC/DC-Wandlers und der 14V Batterie	158
6.3	Bestimmung der Ladebilanz	160
6.4	Geschwindigkeit und Motortemperatur (T) im US-Highway- und ECE-Zyklus bei einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb	163
6.5	Montage eines Batteriesensors der Firma Autokabel	168
6.6	Aufbau eines Batteriesensors	168
6.7	Abschaltstufen innerhalb des Ruhestrommanagements	169
6.8	Leistungsspitzen durch gleichzeitiges Schalten der PWM-gesteuerten Komponenten	173
6.9	Konzept des PWM-Scheduling	174
6.10	Funktionsablauf des Softwaremodells	176
6.11	Toolkette zur Generierung des Quellcodes für den Mikrocontroller . .	177
6.12	Aufbau des Labormusters	178
6.13	Verlauf des Gesamtstroms beim Szenario 3 ohne PWM-Scheduling . .	181
6.14	Verlauf des Gesamtstroms beim Szenario 3 mit PWM-Scheduling . . .	181
6.15	Konzept der Toolkette	183
6.16	Einfachstes Simulink-Modell mit der Schnittstelle zu Simlorer	185
6.17	Einfaches Kfz-Bordnetz dargestellt als elektrisches Ersatzschaltbild . .	190
6.18	Beispiel für einen endlichen, gerichteten, gewichteten Graphen	190
6.19	Einfaches Kfz-Bordnetz dargestellt als Graph	191
6.20	Eingabemaske für das Netzmodell	191
6.21	Klassenstruktur der Modelle und Komponenten	192

6.22	Eingabemaske für die Komponentenaktivierung	195
6.23	Eingabemaske für die klimatischen Bedingungen	197
6.24	Eingabemaske für die Streckenparameter	198
6.25	Eingabemaske für die Randbedingungen	199
6.26	Eingabemaske für die Simulationskonfiguration	201
6.27	Analyse	205
6.28	Erläuterung des Gleichzeitigkeitskoeffizienten	206
6.29	Auswertung der Batteriezyklisierung	207
6.30	Eingabemaske für die automatische Parametervariation	210
6.31	Bewertungsmatrix für den Optimierungsalgorithmus	211
6.32	Beispiel für die Suche nach dem Optimum in der Bewertungsmatrix .	213
6.33	Beispiel für die Suche nach dem Optimum in der Bewertungsmatrix (modifizierter Algorithmus)	213
6.34	Eingabemaske für die Optimierung	214
6.35	Lastenheft (Auszug)	216
6.36	Lastenheft (Auszug)	217
6.37	Bordnetzspannung ohne PWM-Scheduling	219
6.38	Batteriestrom ohne PWM-Scheduling	219
6.39	Bordnetzspannung mit PWM-Scheduling	220
6.40	Batteriestrom mit PWM-Scheduling	220

1 Einleitung (L/S)

Die Einführung der vorliegenden Arbeit mit dem Titel *Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben* behandelt zunächst die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen für die Automobilindustrie, woraus die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Energiemanagements abgeleitet werden kann. Aus den Maßnahmen des anschließend diskutierten ganzheitlichen Energiemanagements ergeben sich die Ziele dieser Arbeit, die am Ende des Kapitels vorgestellt werden.

1.1 Herausforderung für die Automobilindustrie (S)

Die immer größer werdende Mobilität, die hauptsächlich durch die Nutzung des eigenen PKW ermöglicht wird, hat neben Freiheiten, wie z. B. bei der Wahl des Arbeitsplatzes und beim Reisen, auch Umweltbelastungen durch Ressourcenverbrauch und Lärm- und Schadstoffemissionen zur Folge. Daher ist es naheliegend, dass diese Belastungen durch die Gesetzgeber eingeschränkt wurden. Die ersten gesetzlichen Abgasvorschriften wurden bereits in den 1960er Jahren in Kalifornien erlassen, da diese Region aufgrund ihrer geografischen Lage sehr anfällig für Smog ist. In Europa werden Abgasemissionen seit Anfang der 1970er Jahre begrenzt. Zusätzlich zu den gesetzlichen Beschränkungen wurden und werden immer wieder Fahrzeuge, die möglichst wenig Schadstoffe ausstoßen, von den Gesetzgebern z. B. mit Steuervorteilen gefördert. Neben diesen Vorgaben müssen die Automobilhersteller auch die Kundenwünsche nach Fahrspaß, Komfort und Sicherheit berücksichtigen. Die folgenden drei Abschnitte beschäftigen sich mit diesen Herausforderungen für die Automobilhersteller.

1.1.1 Fossile Ressourcen

Im Jahr 2004 lagen die bestätigten weltweiten Ölreserven je nach Quelle bei 1 bis 3 Billionen Barrel¹. Bei einem derzeitigen Weltjahresverbrauch von ca. 30 Milliarden Barrel und einer jährlichen Steigerung des Verbrauchs von 2 % reichen diese Reserven noch ca. 25 bis 55 Jahre. Die Erdgasreserven werden noch ca. 70 Jahre reichen.

¹1 Barrel entspricht ca. 159 l

Auch wenn die Erdöl- und Ergasreserven, die geortet sind und mit der heute zur Verfügung stehenden Technik wirtschaftlich gewonnen werden können, in den letzten Jahren leicht zunehmen, werden die Reserven in absehbarer Zeit zur Neige gehen. Dies und auch die politischen Krisen in den typischen Fördergebieten sorgen für stetig ansteigende Öl- und Gaspreise auf dem Weltmarkt. Allein in den letzten sechs Jahren stieg der Rohölpreis von 20 USD auf 70 USD an. Der steigende Ölpreis führt ebenfalls zu einem Preisanstieg bei den Kraftstoffen, wie in Abbildung 1.1 dargestellt. Dabei wurde die allgemeine Preissteigerung bereits berücksichtigt, indem die jeweiligen Jahresdurchschnittspreise durch den Preisindex, der vom statistischen Bundesamt ermittelt wird, geteilt wurden. Gut zu sehen ist auch hier der starke Preisan-

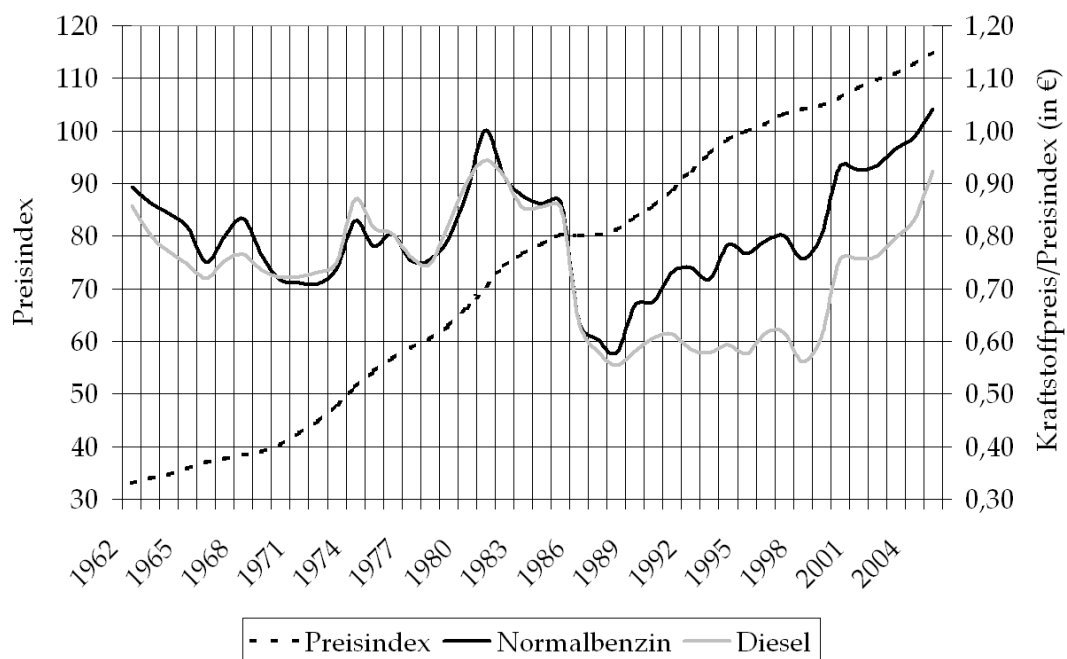


Abbildung 1.1: Entwicklung der Kraftstoffpreise in Deutschland bezogen auf den Preisindex [84][3]

stieg in den letzten Jahren. Damit liegen die Kraftstoffpreise zurzeit auf dem Niveau vom Anfang der 1980er Jahre, kurz nach der zweiten großen Ölkrise, und werden in Zukunft voraussichtlich weiter steigen.

Die Automobilhersteller müssen diese Trends bei der Entwicklung zukünftiger Antriebstechnologien berücksichtigen. Langfristig müssen Antriebe entwickelt werden, die gänzlich ohne fossile Ressourcen arbeiten können. Mittelfristig müssen die Antriebe so sparsam wie möglich werden, um zum einen die noch verfügbaren Ressourcen zu schonen und zum anderen das Autofahren trotz steigender Kraftstoffpreise bezahlbar zu halten.

1.1.2 Gesetze und Förderprogramme

Die ersten Emissionsbeschränkungen in Europa wurden 1970 in Form von Grenzwerten für Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen aus Kraftfahrzeugmotoren eingeführt, welche in den folgenden Jahren weiter verschärft wurden. Ende der 1970er wurden auch der Ausstoß von Stickstoffoxiden und Ende der 1980er die Partikelemissionen für Dieselmotoren gesetzlich beschränkt. Seit 1990 regeln die sogenannten *Euro-Abgasnormen* die Schadstoffemissionen in Europa. In den Tabellen 1.1 und 1.2 sind die Grenzwerte für PKW mit Benzin- und Diesel-Motoren aufgeführt. Der Kraftstoffverbrauch und damit der CO₂-Ausstoß ist in Europa nicht gesetzlich

	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Gültig ab	1992	1996	2000	2005	2009	ca. 2014
CO	3,16	2,2	2,3	1,0	1,0	1,0
(HC + NO _x)	1,13	0,5	—	—	—	—
NO _x	—	—	0,15	0,08	0,06	0,06
HC	—	—	0,2	0,1	0,075	?

Tabelle 1.1: Abgasgrenzwerte [g/km] für PKW mit Otto-Motor in Europa

	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Gültig ab	1992	1996	2000	2005	2009	ca. 2014
CO	3,16	1,0	0,64	0,5	0,5	0,5
(HC + NO _x)	1,3	0,7/0,9	0,56	0,3	0,23	0,17
NO _x	—	—	0,5	0,25	0,18	0,08
PM	0,18	0,08/0,1	0,05	0,025	0,005	?

Tabelle 1.2: Abgasgrenzwerte [g/km] für PKW mit Diesel-Motor in Europa

beschränkt. Allerdings hat sich der VDA² freiwillig verpflichtet, den Kraftstoffverbrauch neu zugelassener PKW bis 2005 um 25 % gegenüber 1990 zu verringern.

²Der Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) mit Sitz in Frankfurt ist der größte gemeinsame Interessenverband der deutschen Autohersteller und seiner Zulieferer. In der Öffentlichkeit ist der VDA bekannt als Veranstalter der alle zwei Jahre stattfindenden Internationalen Automobilausstellung (IAA) in Frankfurt. Seine eigentlichen Aufgaben sind aber die Interessenvertretung, Meinungsaustausch zwischen den Mitgliedern und die Erarbeitung von Standards in der deutschen Automobilindustrie. [112]

Diese Vorgabe konnte von den deutschen Automobilherstellern erfüllt werden. Der ACEA³ hat sich darüber hinaus in einer Selbstverpflichtung dazu bereit erklärt, den CO₂-Austoß der Fahrzeugflotte bis 2008 auf 140 g/km abzusenken, was einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 5,8 l/100 km entspräche. Weiterhin soll bis 2012 eine Absenkung auf 120 g/km erreicht werden, wonach der Flottendurchschnittsverbrauch dann bei 5 l/100 km läge. [4]

Die US-amerikanischen Gesetze (Zero Emission Act) verlangen ab 2008 einen Verkaufsanteil an Straßenfahrzeugen von 4 % für sogenannte *Zero Emission Vehicles*, also im Betrieb gänzlich emissionsfreien Fahrzeugen. Diese Quote kann allerdings auch durch die Produktion sehr emissionsarmer Fahrzeuge mit entsprechend höherem Anteil an der Gesamtstückzahl erreicht werden. Sie soll z. B. ca. zu 60 % von Hybridfahrzeugen abgedeckt werden. Auch Erdgasfahrzeuge mit optimierter Motorentechnik sollen eine entsprechende Quote erreichen.

Um bei den Autofahrern die Anschaffung eines neuen, umweltfreundlicheren PKW zu forcieren, gab es in Deutschland in der Vergangenheit Steuerbefreiungen. Fahrzeuge, die die Euro-3-Norm beziehungsweise Euro-4-Grenzwerte einhielten, waren bis zum 31.12.2005 von der Kfz-Steuer befreit, sofern die Euro-3-Fahrzeuge vor dem 1.1.2000 und die Euro-4-Fahrzeuge vor dem 1.1.2005 zugelassen wurden. Außerdem werden Kraftstoffe, die weniger Emissionen verursachen (z. B. Erdgas und Autogas) im Vergleich zu konventionellen Otto- und Dieselmotorkraftstoffen bis 2018 (Stand 09/2006) wesentlich geringer besteuert.

Die bisherigen europäischen Abgasgrenzwerte führten zu erheblichen Minderungen des Schadstoffausstoßes im Straßenverkehr. Von 1990 bis 2002 wurden die Emissionen von Kohlenmonoxid um 71 %, die von Schwefeldioxid um 97 % reduziert. Dies erforderte die ständige Weiterentwicklung und Verbesserung der Antriebe. Die zukünftigen Abgasnormen werden diese Entwicklung weiter forcieren und Technologien wie Direkteinspritzung und Partikelfilter zum Standard werden lassen.

Der Gesetzgeber reguliert jedoch nicht nur die Emissionen, sondern zwingt die Hersteller, immer mehr Sicherheitssysteme in die Fahrzeuge zu integrieren. In Tabelle 1.3 sind als Beispiel die gesetzlich vorgeschriebenen Rückhaltesysteme aufgeführt. Während in den 1960er Jahre nur für den Fahrer und den Beifahrer ein 3-Punkt-Gurt vorgeschrieben war, müssen in heutigen Fahrzeugen mehrere Airbags, Gurtstraffer und weitere Systeme vorhanden sein. In Zukunft werden auch hier weitere Systeme zum Standard werden.

³Der ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) ist der europäische Automobilherstellerverband. Er repräsentiert 13 große europäische Automobilhersteller, die Mitglieder des ACEA sind. [104]

1960-1970	1980-1990	1990-2000	2000-2010
3-Punkt-Gurt vorne	3-Punkt-Gurt hinten Fahrerairbag	Beifahrerairbag Gurtstraffer Gurtkraftbe- grenzer Seitenairbags 2-Stufen-Airbag	2-Stufen Gurt- kraftbegrenzer Knieairbag Aktive Kopfstützen
+ 3 kg	+ 7 kg	+ 13 kg	+ 10 kg

Tabelle 1.3: Gesetzliche Vorschriften für Rückhaltesysteme und die daraus resultierende Massenzunahme(vgl. [58])

1.1.3 Kundenwünsche und Marktsituation

Aus einer 2006 vom Prognoseinstitut *B&D Forecast* veröffentlichten Studie geht hervor, dass seit dem Jahr 2000 Autos mit einer Leistung unter 100 kW Marktanteile zugunsten leistungstärkerer Fahrzeuge mit mehr als 100 kW verlieren. Auch nimmt der Anteil von höherwertigen Fahrzeugen bei den Neuzulassungen zu.

Die Kunden wünschen sich mehr Fahrspaß, mehr Komfort und mehr Sicherheit im Fahrzeug. Dieser Trend wird auch am Diagramm in Abbildung 1.2 deutlich. Zu sehen ist die Entwicklung der Basisversion des VW Golf über die bisherigen fünf Generationen. Die Motorleistung ist insgesamt um knapp 50 % gestiegen und auch das Fahrzeuggewicht hat signifikant zugenommen. Dies ist vor allem auf die Integration von Komfort- und Sicherheitssystemen zurückzuführen. Trotz der Zunahme von Leistung und Gewicht ist der Kraftstoffverbrauch stetig gesunken. Dies ist auf Maßnahmen zurückzuführen, die im Folgenden noch näher erläutert werden (siehe Abschnitt 1.2). Die Hersteller müssen in Zukunft auch hier versuchen, die Kundenwünsche nach mehr Fahrspaß, Komfort und Sicherheit zu erfüllen und gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch niedrig zu halten. Einige Automobilhersteller haben dabei mit ihren Hybridfahrzeugen bereits das Entwicklungsstadium verlassen und bieten Fahrzeugmodelle auf dem Markt an.

Toyota brachte als erster Hersteller im Jahr 1997 das Hybridfahrzeugmodell *Prius* auf den Markt. Allerdings wurde es zunächst nur auf dem japanischen Markt angeboten. Mittlerweile hat Toyota bereits eine verbesserte zweite Generation des Prius heraus-

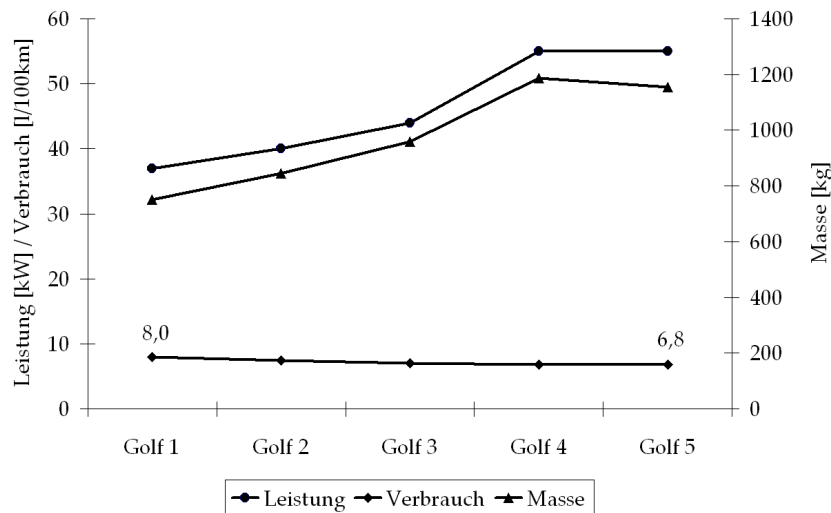


Abbildung 1.2: Entwicklung des VW Golf (Basisausstattung)

gebracht, der nun auch in den USA und in Europa verkauft wird. Der Prius ist mit einem leistungsverzweigten Hybridantrieb ausgestattet, den Toyota als Hybrid Synergy Drive (HSD) bezeichnet. Als Verbrennungsmotor kommt im neuen Prius ein 4-Zylinder-Ottomotor mit 1,5 l Hubraum und einer Leistung von 57 kW zum Einsatz. Er entfaltet bei 4000 $1/\text{min}$ ein Drehmoment von 115 Nm. Der Elektromotor stellt eine Leistung von 50 kW sowie ein Drehmoment von 400 Nm von 0 bis 1200 $1/\text{min}$ bereit. Als Batterietyp wurde eine Nickel-Metallhydrid-Batterie mit einer Kapazität von 6,5 Ah verwendet. Das Hybridsystem erzielt damit eine Systemleistung von 82 kW und ein maximales Drehmoment von 478 Nm bei einer Geschwindigkeit von 0 bis 22 km/h. Das Fahrzeug besitzt ein Leergewicht von 1375 kg und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 170 km/h. Der Prius ist zudem mit einem stufenlosen Getriebe ausgestattet. Damit soll der Prius nach Herstellerangaben insgesamt 4,3 $1/100 \text{ km}$ verbrauchen. Er erfüllt die Abgasnorm Euro 4 mit einer CO_2 -Emission von 104 g/km. [89]

Der Automobilhersteller Honda hat mit dem *Honda Civic Hybrid* der zweiten Generation einen „milden“ Hybriden auf dem Markt platziert. Honda verfolgt dabei das sogenannte IMA-Antriebssystem (Integrated Motor Assist). Angetrieben wird das Fahrzeug hauptsächlich von einem 4-Zylinder-Ottomotor mit 1,3 l Hubraum und einer maximalen Leistung von 62,5 kW. Bei 3300 $1/\text{min}$ stellt dieser ein Drehmoment von 118 Nm bereit. Der elektrische Antrieb ist mit einer 10 kW starken Einheit aus Elektromotor und Generator kleiner als beim Prius dimensioniert. Das maximale Drehmoment von 62 Nm liegt bei 1000 $1/\text{min}$ an. Als elektrischer Energiespeicher kommt ebenfalls eine Nickel-Metallhydrid-Batterie mit einer Kapazität von 6 Ah zum Einsatz. Durch die Kombination beider Antriebe wird eine Systemleistung von maximal 157 Nm und 68,4 kW erzielt. Der Honda Civic Hybrid wird sowohl mit einem CVT-

Getriebe als auch mit einem manuellen 5-Gang-Getriebe ausgeliefert und besitzt ein Leergewicht von maximal 1239 kg. Die Betriebsstrategie sieht vor, dass der elektrische Antrieb nach dem Prinzip eines milden Hybriden nur unterstützend eingesetzt wird. Mit ihm lassen sich Boosterbetrieb, Start-Stopp-Automatik und Rekuperation realisieren. Der Kraftstoffverbrauch liegt dabei im Mittel bei 4,9 l/100 km.

Ver mehrt wird auch über den Einsatz von Hybridantrieben in Fahrzeugen der Oberklasse nachgedacht. Diese Fahrzeuge zeichnen sich typischerweise durch eine hohe Motorisierung bei gleichzeitig hohem Kraftstoffverbrauch aus. Einige Automobilhersteller sehen in der Hybridtechnologie die Möglichkeit, eine kleinere Motorisierung zu wählen, ohne dabei Fahrleistungseinbußen hinnehmen zu müssen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die potentielle Käuferschicht den Mehrpreis in dieser Fahrzeugklasse eher tolerieren wird.

Seit April 2005 bietet Lexus in den USA ein Oberklasse-SUV mit Hybridantrieb an. Markteinführung in Europa war im Juni 2005. Der *RX 400h* wird von einem V6-Otto-Motor mit 3,3 l Hubraum und 155 kW und einem Elektromotor mit 123 kW an der Vorder- und einem Elektromotor mit 49 kW an der Hinterachse angetrieben (elektrischer Allradantrieb). Die Gesamtleistung des Hybridsystems wird mit 200 kW angegeben, da die Motorenleistungen aufgrund der begrenzten Batterieleistung nicht addiert werden können. Der Antrieb basiert auf dem bereits verfügbaren Hybridantriebsstrang des Toyota Prius THS II. Das Fahrzeug kommt damit auf ein Systemdrehmoment von über 700 Nm bezüglich der Kurbelwelle der Verbrennungskraftmaschine. Der Verbrauch bleibt bei moderater Fahrweise unter 10 l/100 km.

Für 2008 haben auch Mercedes und Volkswagen Hybridvarianten ihrer Oberklassefahrzeuge S-Klasse und Touareg angekündigt.

1.2 Ganzheitliches Energiemanagement (L)

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an das Fahrzeug durch neue Emissionsgesetze und Kundenwünsche nach mehr Komfort und Sicherheit ist eine energetische Optimierung des Gesamtfahrzeugs unumgänglich. Die Automobilhersteller müssen diesen Anforderungen mit einem geeigneten ganzheitlichen Energiemanagement innerhalb der Fahrzeugentwicklung begegnen. Dabei ist das Energiemanagement wie alle anderen Managementsysteme zyklisch aufgebaut und basiert auf dem sogenannten Deming-Kreislauf, der in Abbildung 1.3 dargestellt ist. Der Deming-Kreislauf besteht aus den folgenden vier allgemeinen Schritten:

- Planen: Festlegung der Ziele und der anzuwendenden Methoden
- Handeln: Umsetzung des Planes

- Prüfen: Evaluierung der getroffenen Maßnahmen
- Reagieren: Erkennen von Schwachstellen und Durchführen von Änderungen

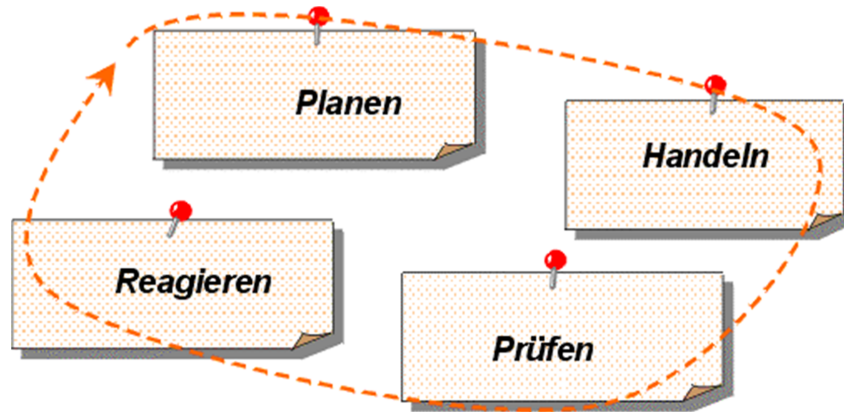


Abbildung 1.3: Deming-Kreislauf als Grundlage eines Energiemanagements

In der Automobilindustrie kann hier zwischen einem passiven und aktiven Energiemanagement unterschieden werden:

Ein passives Energiemanagement hat die Aufgabe, bestehende und neue technische Systeme vor der Fahrzeugintegration und parallel zum Entwicklungspfad einer energetischen Analyse und Optimierung zu unterziehen.

Ein aktives Energiemanagement muss während des Fahrzeugbetriebs und -stillstands in den Energiefluss eingreifen, um einen effizienten Betrieb zu gewährleisten.

Ein von den Automobilherstellern aufgestelltes Ziel des Energiemanagements ist die Verbrauchs- und Emissionsreduzierung. Hierzu sind in den letzten Jahren verschiedene Maßnahmen innerhalb des passiven und aktiven Energiemanagements eingeleitet worden:

Passives Energiemanagement

- Optimierung der Verbrennungsmotoren
- Einführung neuer Materialien und Fertigungsprozesse zur Reduzierung des Fahrzeuggewichtes
- Verbesserung der Aerodynamik
- Entwicklung alternativer Antriebskonzepte

Aktives Energiemanagement

- Entwicklung von optimalen Betriebsstrategien für den Antriebstrang
- Steuerungsalgorithmen für das Bordnetz zur Gewährleistung der Wiederstartfähigkeit

Die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte ist aktuell wohl eines der am stärksten diskutierten Themen in der Automobilbranche. Es zeigt sich, dass durch deren Einführung Auswirkungen auf andere Teilsysteme im Fahrzeug resultieren, die weitere Maßnahmen des ganzheitlichen Energiemanagements erforderlich machen.

Eine Auswirkung ist hier die Änderung des elektrischen Energienetzes des 14 V Bordnetzes in Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb zu einem Zweispannungsnetz in Fahrzeugen mit alternativem Antrieb. Dieses Zweispannungsnetz teilt sich in das herkömmliche 14 V Bordnetz und in ein Traktionsnetz höherer Spannung (≥ 42 V) auf. Das Traktionsnetz dient hierbei zur elektrischen Versorgung des Elektromotors und der Nebenaggregate wie z. B. des Klimakompressors. Des Weiteren sind antriebsrelevante Energiespeicher wie z. B. NiMH-Batterien und Supercaps an dem Traktionsnetz angeschlossen. Das Traktions- und Bordnetz werden dabei über einen DC/DC-Wandler gekoppelt.

Hieraus ergibt sich als neue Maßnahme des passiven Energiemanagements die optimale Dimensionierung sowohl der Komponenten des Traktionsnetzes als auch der Energieversorgungskomponenten des Bordnetzes bestehend aus DC/DC-Wandler und 14 V Batterie. Des Weiteren führt die Zunahme der verbauten Antriebskomponenten auch zu weiteren Maßnahmen innerhalb des aktiven Energiemanagements. Es ist dabei eine Erweiterung der Betriebsstrategie notwendig, um die komplexeren Energieflüsse zwischen den Antriebskomponenten im Vergleich zu konventionellen Antriebssystemen effizient steuern bzw. regeln zu können.

1.3 Ziele der Arbeit (L/S)

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Umsetzung der durch die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte zusätzlichen Maßnahmen innerhalb des aktiven und passiven Energiemanagements zu leisten.

Um die Betriebsstrategien heutiger und zukünftiger Fahrzeuge zu verbessern und damit zu einem effizienteren Fahrbetrieb beizutragen, ist ein Konzept zur Prognose von Fahrsituationen zu entwickeln. Dieses Prognosekonzept soll nur die heute im Fahrzeug serienmäßig verbaute Sensorik nutzen, um eine kurzfristige Umsetzung in allen Fahrzeugklassen zu ermöglichen. Außerdem soll dieses Konzept eine Anpassung der Betriebsstrategie an die Fahreigenschaften des Fahrzeugführers erlauben

und nicht umgekehrt. Dieser Ansatz grenzt sich von den bisherigen veröffentlichten Prognosekonzepten ab, die auf aktuellen und zukünftigen vorausschauenden Assistenzsystemen beruhen. Dabei sind die aktuellen Systeme einerseits noch nicht serienmäßig in den einzelnen Fahrzeugklassen verfügbar und andererseits zum Teil von der Bedienung und Akzeptanz des Fahrers abhängig.

Ausgehend von dem hier vorliegenden Kenntnisstand existiert zur Zeit kein Entwurfswerkzeug für die ganzheitliche Auslegung der Bordnetzenergieversorgung in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Es soll daher eine auf Simulationen basierende Toolkette entworfen werden, die eine automatisierte Vorgehensweise unterstützt und für jeden Fahrzeugtyp und dessen Antriebsart geeignet ist. Hierfür ist die Einbindung einer zu entwickelnden Modellbibliothek für die Bordnetzkomponenten ein wesentlicher Bestandteil. Die Modelle sollen dabei mit einer simulatorunabhängigen Beschreibungssprache erstellt werden. Des Weiteren sind Algorithmen für die Ansteuerung der Komponenten in die Toolkette einzubinden, um deren Auswirkungen auf das Bordnetzverhalten und auf die Spezifizierung der Bordnetzenergieversorgung untersuchen und bewerten zu können.

1.4 Übersicht der Arbeit (L/S)

Kapitel 2 gibt einen Überblick der in Hybridfahrzeugen einsetzbaren Antriebsstrukturen und verbauten Antriebskomponenten. Weiterhin werden die Merkmale heutiger Betriebsstrategien für die Komponenten des Antriebssystems und die zugrunde gelegten Optimierungsverfahren erläutert.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 ein Systemkonzept vorgestellt, welches mit Hilfe einer Fahrstreckenerkennung die Prognose von Geschwindigkeits- und Höhenprofilen ermöglicht. Der Nutzen dieser Prognose für die Betriebsstrategie wird abschließend untersucht und bewertet.

Im Kapitel 4 wird ausgehend von einer allgemeinen Betrachtung des elektronischen Fahrzeugsystems und der Energieversorgung des Bordnetzes die installierte Leistung der verbauten Bordnetzkomponenten in Abhängigkeit von der Antriebsart und des Ausstattungsgrades untersucht. Des Weiteren erfolgt anhand von Messungen die Analyse des Betriebsverhaltens der Bordnetzkomponenten und eine Diskussion möglicher Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess für die Dimensionierung der Bordnetzenergieversorgung.

Basierend auf den Ergebnissen der in Kapitel 4 durchgeführten Bordnetzanalyse wird in Kapitel 5 die Entwicklung einer Modellbibliothek für die Bordnetzkomponenten vorgestellt, die als Grundlage für die Dimensionierung der Energieversorgungskomponenten des Bordnetzes mittels Simulationen dient.

In Kapitel 6 wird eine allgemeine Methodik dargestellt, die auf Basis eines Optimierungsalgorithmus in Abhängigkeit einer Gütefunktion und unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen eine bestmögliche Spezifizierung der Komponenten für die Bordnetzenergieversorgung in Fahrzeugen sowohl mit konventionellem als auch mit alternativem Antrieb erlaubt. Anschließend wird die Umsetzung der Methodik in eine automatisierte Toolkette dargestellt, die aus den kommerziellen Simulationstools Matlab/Simulink und Simplorer und der im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Software Avanti (Advanced Analysis Tool and Simulation Interface) besteht.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung einschließlich eines Ausblicks in Kapitel 7.

2 Fahrzeuge mit hybriden Antriebssystemen (L/S)

Ein Hybridfahrzeug besteht definitionsgemäß aus einer Kombination von mindestens zwei unterschiedlichen Antriebssystemen. [21] Der Begriff Antriebssystem beinhaltet dabei den Energiespeicher und den Motor. Bei der aktuellen Entwicklung von Hybridfahrzeugen werden vorwiegend Verbrennungs- und Elektromotoren verbaut, wobei langfristig die Verbrennungsmotoren aufgrund der endlichen Ressourcen an fossilen Rohstoffen von Brennstoffzellen abgelöst werden. [81] Als Energiespeicher kommen heutzutage flüssige und gasförmige Kraftstoffe, Batterien und Kondensatoren zum Einsatz.

In den folgenden Kapiteln werden sowohl unterschiedliche Hybridstrukturen als auch der Grad der Hybridisierung bei aktuellen Fahrzeugtypen vorgestellt. Darauf aufbauend werden mögliche Betriebsstrategien für ein Hybridfahrzeug erläutert und die damit verbundenen Möglichkeiten zum Einsatz von Optimierungsverfahren dargestellt.

2.1 Hybridstrukturen (L)

Beim Hybridantrieb wird zwischen seriellem und parallelem Hybridantrieb unterschieden. Mischformen dieser beiden Antriebsstrukturen stellen der leistungsverzweigte und der kombinierte Hybrid dar. Da der kombinierte Hybrid eine eher untergeordnete Rolle einnimmt [21], wird er im Folgenden nicht weiter betrachtet.

2.1.1 Serieller Hybridantrieb

Der Fahrzeugantrieb erfolgt bei der seriellen Hybridstruktur, wie in Abbildung 2.1 verdeutlicht, grundsätzlich über den „Elektromotor 2“. Der Verbrennungsmotor hat keine direkte mechanische Verbindung zu den Antriebsrädern, stattdessen treibt er den „Elektromotor 1“ an, der ständig als Generator arbeitet. Die aus dem Generator erzeugte und aus der Batterie bereitgestellte Energie dient zur Versorgung des „Elektromotors 2“.

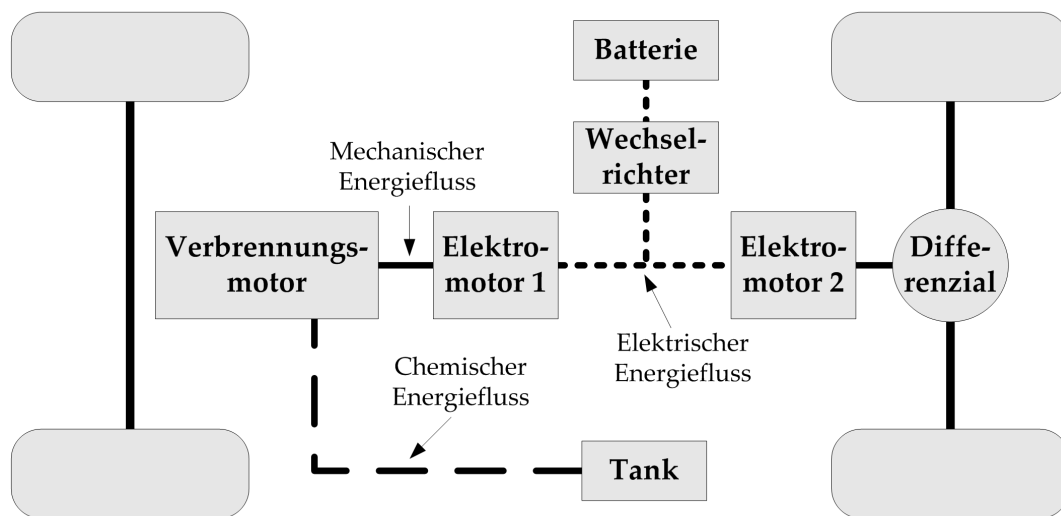


Abbildung 2.1: Serielle Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs

2.1.2 Paralleler Hybridantrieb

Bei der parallelen Hybridstruktur werden sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor mechanisch mit den Antriebsrädern gekoppelt. Abbildung 2.2 stellt die grundlegende parallele Antriebsstruktur dar. Durch ein oder mehrere Getriebe und Trennkupplungen können die beiden Antriebssysteme sowohl einzeln als auch gleichzeitig genutzt werden. Die Trennkupplung ermöglicht dem Fahrzeug, in verschiedenen Betriebsmodi ohne das Schleppmoment des Verbrennungsmotors zu arbeiten. Der Elektromotor arbeitet dabei entweder als Motor oder als Generator.

2.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Die Struktur des leistungverzweigten Hybridantriebs gleicht, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, der Überlagerung der parallelen und seriellen Struktur. Über ein Planetengetriebe, das in Abschnitt 2.3 genauer erklärt wird, kann der Leistungsfluss im Antriebsstrang gesteuert werden. Der Verbrennungsmotor kann nur dann Leistung zu den Rädern übertragen, wenn der „Elektromotor 2“ als Generator arbeitet und somit ein Drehmoment aufbringen kann. Die von dem „Elektromotor 2“ erzeugte Leistung wird an den „Elektromotor 1“ weitergeleitet, der als Fahrzeugantrieb arbeitet und so zur Beschleunigung des Fahrzeugs beiträgt. Dadurch wird die Leistung in einen mechanischen und elektrischen Pfad verzweigt. Weiterhin erreicht man durch diese Struktur neben der Leistungsverzweigung auch eine stufenlos veränderliche Übersetzung.

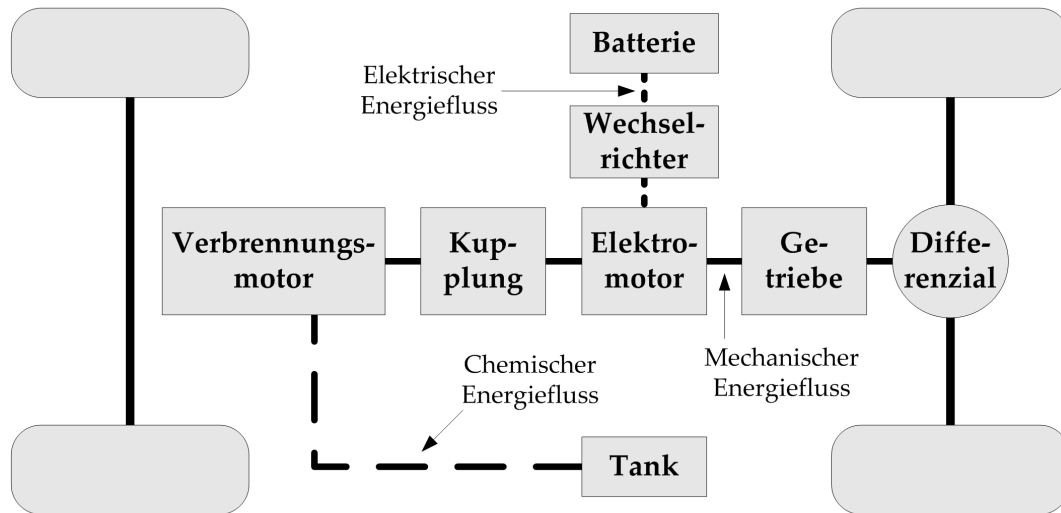


Abbildung 2.2: Parallele Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs

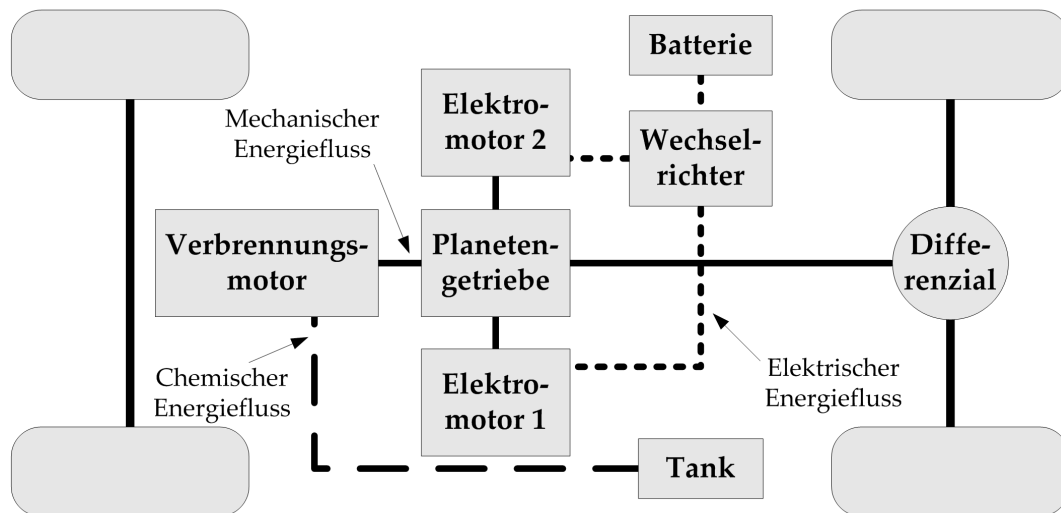


Abbildung 2.3: Leistungsverzweigte Antriebsstruktur eines Hybridfahrzeugs

2.2 Grad der Hybridisierung (L)

Der Grad der Hybridisierung gibt das Verhältnis der installierten Leistung der Elektromaschine P_{EM} zu der gesamten Antriebsleistung $P_{VM}+P_{EM}$ an. Mit der Erhöhung des Hybridisierungsgrades ist auch eine Erhöhung der Spannungsebene von 14 V über 42 V bis hin zu 650 V erforderlich. Weiterhin sind in Abhängigkeit der Leistung der Elektromaschine zusätzliche Funktionen im Antriebsstrang realisierbar, die in Abbildung 2.4 unter Berücksichtigung des notwendigen Hybridisierungsgrades dargestellt sind. Es wird hier zwischen Mikro-, Mild-, Voll- und Power-Hybrid unterschieden.

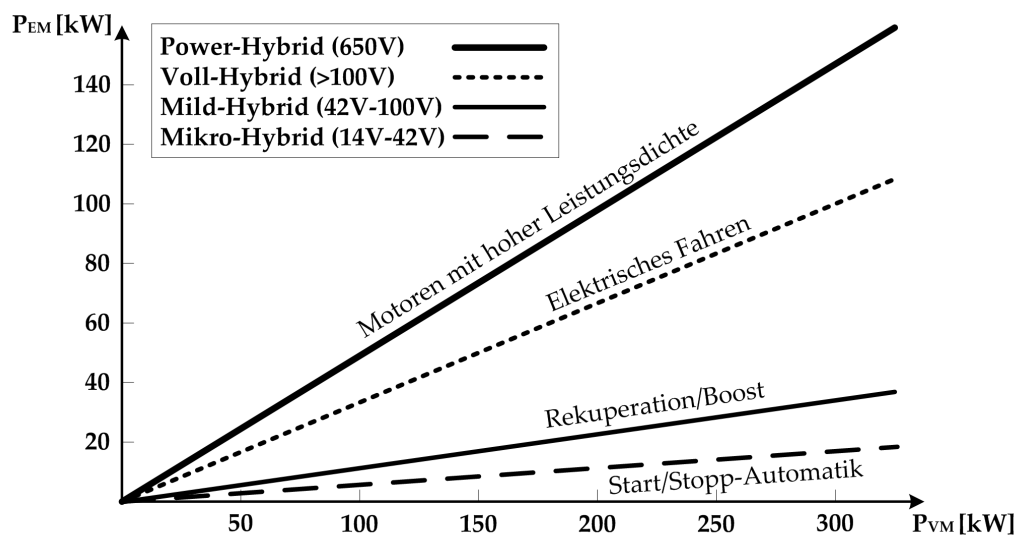


Abbildung 2.4: Antriebsfunktionen in Abhängigkeit vom Hybridisierungsgrad

Der Mikro-Hybrid verfügt lediglich über eine Start/Stopp-Automatik, die im Schubetrieb (z. B. bei Bergabfahrt) sowie bei Stillstand den Verbrennungsmotor abschaltet und beim Betätigen des Gaspedals automatisch innerhalb von 0,2 s wieder startet. Beim Mild-Hybrid wird der Elektromotor zusätzlich zur Unterstützung des Verbrennungsmotors eingesetzt. Hierbei ist die Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) und die Unterstützung des Verbrennungsmotors bei hohen Leistungsanforderungen (Boost) durch die Elektromaschine möglich. Weiterhin ist durch den Elektromotor eine Dämpfungswirkung im Antriebsstrang realisierbar, wodurch sich die Auswirkungen der Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors reduzieren lassen. Die komplexesten Systeme mit den höchsten Hybridisierungsgraden sind der Voll- und Power-Hybrid, bei denen das Fahrzeug bei bestimmten Belastungssituationen rein elektrisch und damit emissionsfrei gefahren werden kann. In Tabelle 2.1 sind exemplarisch einige aktuelle Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Hybridisierungsgraden aufgelistet.

Fahrzeug	Hybridisierungsgrad
Toyota Prius	Voll-Hybrid
Honda Civic Hybrid	Mild-Hybrid
Citroen C3	Mikro-Hybrid
Mercedes S350 Hybrid	Mikro-Hybrid
Lexus RX400h	Voll-Hybrid
Lexus GS450h	Power-Hybrid

Tabelle 2.1: Übersicht aktueller Hybridfahrzeuge

2.3 Antriebskomponenten (S)

Ein hybrides Antriebssystem ist ungleich aufwendiger im Aufbau und in seiner Komponentenvielfalt als ein herkömmliches Antriebssystem. So werden beim Hybridfahrzeug einerseits mehr Aggregate benötigt (z. B. Elektromotoren), andererseits werden herkömmliche durch veränderte Komponenten ersetzt. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Systemkomponenten des Hybridfahrzeugs vorgestellt.

2.3.1 Verbrennungskraftmaschinen

Als Verbrennungskraftmaschinen kommen vor allem moderne Otto- sowie Dieselmotoren zum Einsatz. Beide zeichnen sich durch einen hohen Entwicklungsgrad aus, es werden Technologien wie die Direkteinspritzung und Turboaufladung verwendet. Das Ziel sind sparsame und emissionsarme Verbrennungsmotoren, die in der Auslegung meist kleiner ausfallen als bei konventionellen Fahrzeugen, da sie zusammen mit einem elektrischen Antrieb eingesetzt werden.

Bei der parallelen Hybridstruktur wird der Verbrennungsmotor in der Regel möglichst klein dimensioniert. Hingegen ist beim seriellen Hybrid die Leistungsfähigkeit des elektrischen Zwischenspeichers ausschlaggebend für die Wahl des Verbrennungsmotors. Sie hängt letztlich auch von der gewünschten Fahrleistung ab. Der höhere Kraftstoffverbrauch des Ottomotors im Teillastverhalten kann durch den möglichen entkoppelten Betrieb gemindert bzw. vermieden werden. Mit einer modernen Abgasreinigungsanlage und dem Einstellen des verbrauchsoptimalen Betriebspunktes lassen sich so geringere Emissions- und Kraftstoffverbrauchswerte erzielen. Der

Dieselmotor weist gerade im Teillastbereich einen deutlich geringeren Kraftstoffverbrauch auf. Allerdings schneidet er bei den Emissionswerten schlechter ab. Er bewirkt eine höhere Umweltbelastung durch vermehrte Rußpartikel- und Stickoxidemission. Des Weiteren ist der Dieselmotorbetrieb auch mit einer größeren Geräuschentwicklung verbunden als beim Ottomotor, was eine gewisse Komforteinschränkung bedeutet.

Die besondere Betriebsweise würde auch den Einsatz von Gasturbinen oder Stirlingmotoren zulassen. [102] [28] Ein ebenfalls im Teillastverhalten vorhandener hoher Kraftstoffverbrauch der Gasturbine könnte vermieden werden. Vorteilig wären ein Mehrstoffbetrieb, ein einfacher Aufbau und ein geringerer Platzbedarf. Weiterhin zeichnet sich die Gasturbine durch einen erschütterungsfreien Lauf aus. Nachteilig sind hingegen aber starke Ansaug- und Verbrennungsgeräusche sowie ein langsames Ansprechverhalten. Des Weiteren müssen äußerst hitzebeständige Materialien verbaut werden. [10] Der Stirlingmotor weist ähnliche Vorteile wie die Gasturbine auf und besitzt zudem noch einen besseren Wirkungsgrad. Durch große Wärmetauscher wird aber ebenfalls ein großer Bauraum eingenommen und eine aufwendige Fertigung verursacht höhere Kosten. [15] Beide Konzepte wurden aber bislang noch nicht weiter in der Automobilindustrie erprobt. Da der Stirlingmotor beispielsweise eher im stationären Einsatz zu finden ist, bestehen noch keine kleineren Varianten für den automobilen Gebrauch. [102]

2.3.2 Elektromotor

Bei der Auswahl des Elektromotors für den Fahrzeugantrieb kommen mehrere Bauarten in Betracht. Bei der Auslegung des Elektromotors kommt es beim Hybridfahzeugsinsatz sehr auf das geforderte Leistungsprofil und die verwendete Betriebsstrategie im Zusammenspiel mit dem Verbrennungsmotor an. Diese Daten geben maßgeblich die Motorgröße und Spezifikation des Elektromotors vor. [24] Bei dem Maschinenentwurf für Hybridfahrzeuge ist darauf zu achten, dass der Elektromotor den Anforderungen für kurzzeitige Pulslasten (thermische Überlastbarkeit), eine hohe Dynamik und einen guten Wirkungsgrad im Bereich des maximalen Momentes gerecht wird. Im Vergleich zum reinen Elektrofahrzeug wird aber eine andauernde Maximalleistung des Fahrzeuges größtenteils vom Verbrennungsmotor getragen.

2.3.3 Speicher

Als elektrische Energiespeicher eignen sich neben Batterien auch Doppelschichtkondensatoren und Schwungräder. In Hybridfahrzeugen können grundsätzlich die gleichen Batterietypen verwendet werden wie bei den reinen Elektrofahrzeugen. Welche

Batterietypen mit zugehöriger Dimensionierung zum Einsatz kommen hängt von der Betriebsstrategie ab. Große emissionsfreie Reichweiten, ermöglicht durch den rein elektrischen Betrieb, erfordern hochenergetische Batterien. Damit stellen sich aber ähnliche Problem bzgl. Kosten, Gewicht und Packaging wie beim Elektrofahrzeug. Wird die Batterie hingegen als Leistungspuffer beispielsweise zur Bremsenergieerückgewinnung oder zur kurzzeitigen Beschleunigungsunterstützung benötigt, so muss sie sehr hohen Lade- und Entladeströmen standhalten. Eine hohe gewünschte Zyklenlebensdauer erfordert daher auch ein aufwendiges Batteriemanagement. Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Batterien entsprechen derzeit am ehesten den Anforderungen und überzeugen durch eine hohe Leistungsdichte und einen hohen Energieinhalt. Die Blei/Gel-Batterie ist zwar aus kostentechnischer Sicht sehr interessant, eignet sich für Hybridfahrzeuge aber nur bedingt. Lade- und Entladeleistung sind gering und sinken schnell bei niedrigen Temperaturen. Beispielsweise muss bei Ladezuständen von mehr als 50 bis 60 % die Ladeleistung aufgrund der Überschreitung der Gasspannung reduziert werden. Leistungsfähige Lithiumbatterien für Hybridfahrzeuge sind zur Zeit noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung. [15] [24] [102]

Doppelschichtkondensatoren (DSK), die auch Super- oder Ultracaps genannt werden, bestehen hauptsächlich aus zwei Elektroden (Elektronenleiter), flüssigem Elektrolyt (Ionenleiter) und einem Separator. Das Energiespeicherprinzip beruht auf dem Effekt, dass die Ladung einer Elektrode an der Grenzfläche zum Elektrolyt durch einen Überschuss der entsprechend entgegengesetzt geladenen Ionen im Elektrolyt kompensiert wird. Die so gebildeten Doppelschichten lassen sich reversibel be- und entladen. Der Separator verhindert dabei den elektrischen Kontakt der Elektroden. Durch hochporöse Kohlenstoffoberflächen der Elektroden lässt sich die elektrisch wirksame Oberfläche erheblich vergrößern. Dadurch werden Kapazitäten in der Größenordnung von einigen Kilofarad bei geringem Volumen erzielt. Die Spannung kann bis zu drei Volt betragen. Höhere Spannungen lassen sich durch eine Reihenschaltung realisieren. DSK zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte aber eher geringe Energiedichte aus. Im Vergleich zu herkömmlichen Batterien ist die gespeicherte Energie viel schneller verfügbar oder rückladbar. Ebenso sind sie der Batterie bei der Anzahl der Lade- und Entladezyklen weit überlegen. Allerdings entlädt sich ein DSK sehr viel schneller als es bei einer Batterie der Fall ist. DSK können momentan eine Batterie noch nicht ersetzen. Sie stellen aber eine gute Systemergänzung dar, wenn sie für bestimmte Situationen genutzt werden. Der Einsatz von DSK ist als sinnvoll zu erachten, falls sich die Lade- und Entladezeiten im Bereich von fünf bis 60 s bewegen. Ein Hauptanwendungsgebiet findet sich in der Bremsenergieerückgewinnung und -speicherung, wenn es darauf ankommt innerhalb von kürzester Zeit große Energiemengen aufzunehmen. Die so gewonnene Energie kann dann z. B. zur Bereitstellung von Beschleunigungsleistung, zum Starten des Verbrennungsmotors bei vorheriger Abschaltung im Stand oder zur Stabilisierung der Bordnetzspannung

genutzt werden. Für den Betrieb im Fahrzeug sind aber auch Spannungswandler notwendig, wobei die effektive Energiebereitstellung der DSK im System auf die Hälfte absinken kann. [47] [28] [24]

Schwungradspeicher, die aus Kohlefaser-Verbundmaterial bestehen, können ebenfalls sehr hohe Energien zwischenspeichern. Dabei wird ein scheibenförmiger Drehkörper z. B. bei einem Bremsvorgang in Rotation versetzt. Die dabei aufgenommene Energie kann dann innerhalb kurzer Zeit wieder abgerufen werden. Die Speicherkapazität hängt maßgeblich von der maximalen Drehzahl und der Massenverteilung ab. Für die Realisierung verlustarmer Systeme werden Magnetlager eingesetzt. Diese Technik wird derzeit aber vorrangig in Bussen oder Schienenfahrzeugen getestet. Ein großes Problem stellt aber noch die Sicherheit solcher Speicher da. Im Falle des Systemzusammenbruchs wird die gespeicherte Energie in extrem kurzer Zeit freigesetzt, was zu einem erheblichen Gefährdungspotential führt. [28] [24]

2.3.4 Getriebe

Bei Hybridfahrzeugen können generell alle bekannten Getriebearten eingesetzt werden. Bei dem seriellen Hybrid kann aufgrund der Entkopplung des Verbrennungskraftmotors ein Stufengetriebe gänzlich entfallen. Eine wesentliche Rolle spielen Getriebe daher nur bei der Parallelhybridstruktur und den Mischformen. Es empfiehlt sich, bei diesen Anordnungen nicht zuletzt zur Entlastung des Fahrers die Schaltung sowie das Zu- und Abschalten der unterschiedlichen Aggregate zu automatisieren. Konventionelle Automatikgetriebe eignen sich nicht so gut aufgrund ihrer hohen Wandlerverluste. Bei dem Parallelhybrid werden daher oftmals halbautomatische Getriebe verbaut, bei denen die Kupplungsbetätigung sowie das Umschalten zwischen elektrischer und verbrennungsmotorischer Betriebsart automatisch erfolgt. [15] [102]

Bei der Drehzahladdition von parallelen und für leistungsverzweigte Hybridantriebe werden Planetengetriebe verwendet. Ein einfacher Planetenradsatz besteht aus einem Sonnenrad, einem Hohlrad, Planetenrädern und dem Planetenradträger. Verschiedene Getriebeübersetzungen werden dadurch ermöglicht, dass entweder das Sonnenrad, das Hohlrad oder der Planetenträger angetrieben wird. Eines der drei Teile muss dabei festgebremst sein. Durch die Verwendung von solchen Planetengetrieben ist ein Gangwechsel ohne Kraftflussunterbrechung möglich. Des Weiteren wirken nur kleine Zahnkräfte, da das Drehmoment auf mehrere Zahnräder verteilt wird. [10]

Für die Momentenaddition kommen Stirnradgetriebe zum Einsatz. Bei ihnen greifen zwei parallele Wellen mit zwei unterschiedlich großen Zahnräder ineinander. [28] Eine weitere Alternative ist ein sogenanntes CVT-Getriebe (Continuous Variable Trans-

mission) Es handelt sich dabei um ein stufenloses Getriebe, bei dem die Übersetzung weitestgehend so gewählt werden kann, dass sich der Betriebspunkt des Verbrennungsmotor im Bereich des minimalen Kraftstoffverbrauchs befindet. Bei der mechanischen Ausführung eines CVT-Getriebes ist der Variator das Kernelement. Er besteht aus zwei Kegelscheibenpaaren, zwischen denen die Kraftübertragung mit Hilfe eines sogenannten Umschlingungselements ermöglicht wird. Durch hydraulischen Druck wird der Abstand zwischen den beiden Scheibenpaaren axial verändert, was eine Änderung des Laufradius des Umschlingungselements und damit der Übersetzung bewirkt. [15]

2.4 Betriebsstrategie (L)

Die Betriebsstrategie umfasst die optimale Steuerung bzw. Regelung der Einzelkomponenten in einem konventionellen oder alternativen Antriebssystem. Dabei ist ein Steuerungsspielraum vorhanden, der aufgrund der Betriebsgrenzen der Komponenten beschränkt ist. Diesen bezeichnet man bei der Formulierung von Optimierungsproblemen als Suchraum, der alle möglichen Lösungen enthält. Des Weiteren müssen innerhalb des Suchraums Restriktionen (Nebenbedingungen) berücksichtigt werden. Falls mehrere mögliche Lösungen miteinander verglichen werden müssen, ist zuvor eine entsprechende Zielsetzung (eine oder mehrere Zielfunktionen) zu definieren. Eine optimale Findung von Betriebspunkten innerhalb der Betriebsstrategie kann daher wie folgt beschrieben werden:

Bestimme diejenigen Betriebspunkte der Komponenten, die die spezifizierte Zielsetzung unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen am besten erfüllt.

Heutige Betriebsstrategien optimieren hierbei charakteristische Fahrzeugeigenschaften, wie z. B. die Fahrleistung, den Verbrauch, die Emissionen, den Fahrkomfort oder die Fahrdynamik. Dabei liegt sehr häufig ein mehrdimensionales Optimierungsproblem zugrunde, dessen einzelne Ziele gegenläufig sein können. Abbildung 2.5 verdeutlicht dies exemplarisch an den Regelkennlinien eines Verbrennungsmotors für die Optimierungskriterien Verbrauch, Geräusch und Fahrdynamik, die deutlich verschiedene Betriebspunkte haben können.

Die vorwiegend genutzten Stellgrößen in den Betriebsstrategien sind die Drehzahl und das Drehmoment der Antriebskomponenten. Dabei bieten serielle Hybridantriebe, Mischhybride und parallele Hybridantriebe mit CVT-Getriebe im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen durch die uneingeschränkte Variation des Last- und Leistungskollektivs die meisten Freiheitsgrade bei der Betriebsweise des Verbrennungsmotors, der entweder dem aktuellen Leistungsbedarf folgend

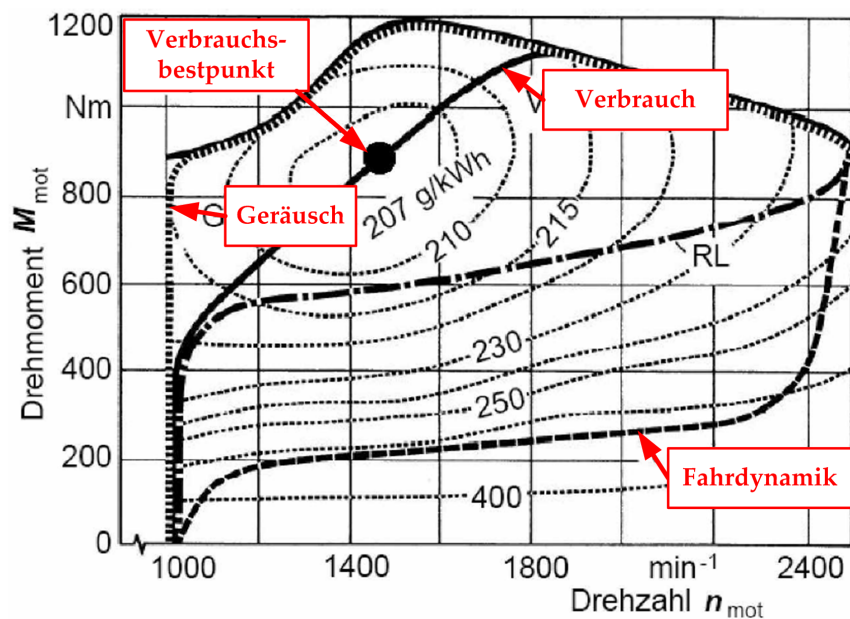


Abbildung 2.5: Unterschiedliche Regelkennlinien eines Verbrennungsmotors für die Optimierungskriterien Verbrauch, Geräusch und Fahrdynamik

statisch, intermittierend oder phlegmatisiert, d.h. mit begrenzter Dynamik betrieben werden kann und dadurch verbrauchs- und emissionsgünstige Betriebsbereiche nutzt. [102]

Für die Umsetzung der Betriebsstrategien in Hybridfahrzeugen wurden in den letzten Jahren in mehreren Arbeiten unterschiedliche Optimierungsverfahren eingesetzt, die entweder für die Offline- oder Online-Optimierung geeignet sind. Die Offline-Optimierung setzt die Vorgabe des vollständigen Fahrzyklus voraus und ist daher nur für Fahrzeugsimulationen geeignet. Aus den Simulationsergebnissen können so Regelungsstrukturen und optimale Kennfelder für den Fahrbetrieb abgeleitet werden. Dagegen werden bei der Online-Optimierung die bestmöglichen Sollwerte für den Antriebsstrang während des Fahrbetriebs basierend auf den verfügbaren Daten des aktuellen Zeitintervalls bestimmt, da hier der Fahrzyklus nicht im voraus bekannt ist. [43]

Die Optimierungsverfahren können in mathematische und heuristische Verfahren eingeteilt werden. Mathematische Verfahren durchsuchen den gesamten Suchraum, wobei die Optimalität der gefundenen Lösung bewiesen werden kann. Dagegen beruhen die heuristischen Verfahren auf Expertenwissen, das der Systementwickler durch Erfahrung erworben hat. Aus diesem Grund sind die darauf beruhenden Betriebsstrategien in ihrer Komplexität, ihrer Funktionalität und ihrem Optimierungspotenzial begrenzt. Die Heuristik führt aber zu einfachen und verständlichen

Betriebsstrategien, wodurch das Verhalten auch in Grenzbereichen gut abschätzbar ist.

Bei der Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens für die Betriebsstrategie sind folgende Kriterien heranzuziehen:

- Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens einzelner Komponenten
- Adaptivität an veränderte Randbedingungen während des Fahrbetriebs
- Robustheit gegen gestörte oder fehlerhafte Daten
- Rechen- und Speicheraufwand
- Finden eines globalen Optimums

In mehreren Veröffentlichungen wurden mit der dynamischen Optimierung mathematische Verfahren und mit den genetischen Algorithmen, den Fuzzy Methoden und den Neuronalen Netzen heuristische Verfahren auf ihre Anwendbarkeit in einer Betriebsstrategie hin untersucht. Tabelle 2.2 zeigt eine Bewertung dieser Optimierungsverfahren anhand der oben dargestellten Kriterien. Bei der Bewertung wird hier zwischen geeignet (+), teilweise geeignet (o) und nicht geeignet (-) unterschieden. Die

Verfahren		Berücksichtigung von Nichtlinearitäten	Adaptivität	Robustheit	Rechen- und Speicheraufwand	Globales Optimum
mathematisch	Dynamische Programmierung	+	-	-	-	+
	Genetische Algorithmen	+	+	o	o	o
heuristisch	Fuzzy Methoden	+	-	+	+	-
	Neuronale Netze	+	o	+	+	o

Tabelle 2.2: Bewertung ausgewählter Optimierungsverfahren hinsichtlich relevanter Kriterien für die Betriebsstrategie

Bewertung dieser ausgewählten Optimierungsverfahren zeigt die Vor- und Nachteile der mathematischen und heuristischen Verfahren. Dabei wird deutlich, dass die heuristischen Verfahren hinsichtlich der Adaptivität, der Robustheit und des Rechen- und Speicheraufwandes Vorteile gegenüber dem mathematischen Verfahren haben. Hieraus resultiert, dass die heuristischen Verfahren eher für die Online-Optimierung

anwendbar sind. Des Weiteren ist eine Kombination verschiedener Verfahren für eine Betriebsstrategie denkbar, um die Nachteile der Optimierungsverfahren aufzuheben und somit eine bestmögliche Online-Optimierung zu erreichen.

2.5 Schlussbetrachtung (L)

Die zur Zeit stark auf die Hybridtechnik fokussierte Entwicklungsarbeit europäischer Automobilhersteller ist unter anderem durch die zukünftige Marktsituation in den USA mit einem prognostizierten Wachstum von bis zu 25% innerhalb der nächsten 10 Jahre [95], die hohen Kraftstoffpreise und die strengen Emissionsauflagen begründet. Hinzu kommt, dass Toyota den Hybridantrieb mit dem Prius als erste Wahl für besonders umweltbewusste Autofahrer auf dem Markt positioniert hat. [74]

Die Vorteile des Hybridfahrzeugs liegen einerseits bei einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 20% im städtischen Stop-and-go-Verkehr [98] und andererseits in der Möglichkeit des emissionsfreien Fahrens bei niedrigen Geschwindigkeiten. Zudem sind mit einem Hybridfahrzeug durch den zusätzlichen Elektromotor hohe Fahrleistungen erreichbar. Die guten Verbrauchswerte sind auf die elektrische Bremsenergie rückgewinnung zurückzuführen, die am besten unter instationären Stadtfahrtbedingungen erzielt werden. Bei konstanteren Fahrbedingungen wie beispielsweise auf der Autobahn ist dieser Effekt deutlich geringer. Dies wurde auch durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messfahrten bestätigt, wo der theoretisch am Rad verfügbare Anteil an Rekuperationsenergie bei einer Stadtfahrt bei ca. 17 % und bei einer Fahrt mit Autobahnabschnitten bei ca. 9 % lag.

Laut [100] sind Hybridfahrzeuge hinsichtlich der ökologischen Gesamtbilanz negativ zu beurteilen. Dies liegt unter anderem an der sehr aufwendigen Herstellung, den begrenzten Verbrauchsvorteilen, dem Mehrgewicht und der Entsorgung der Traktionsbatterien. Die mit der aufwendigen Herstellung verbundenen Kosten des Toyota Prius liegen laut [80] 2500 Euro über einem vergleichbaren Dieselfahrzeug. Der Mildhybrid ist dagegen preiswerter herzustellen und bietet durch den Starter-Generator ebenso deutliche Verbrauchsvorteile. [99]

Aus mehreren Veröffentlichungen wird ersichtlich, dass Automobilhersteller bei der Umsetzung des Hybridantriebs unterschiedliche Wege unter Berücksichtigung von Kostenaspekten, geplanten Stückzahlen und Märkten beschreiten. Toyota verfolgt dabei mit der leistungsverzweigten Antriebsstruktur im Prius das komplexeste und teuerste Konzept. [99] Die Frage, ob ein Diesel-Elektrohybrid aufgrund seiner besseren Verbrauchswerte dem Benzin-Elektrohybrid vorzuziehen ist, kann aufgrund seines höheren Preises und Gewichtes und der schlechteren Akzeptanz in den USA zur Zeit nicht definitiv beantwortet werden. [94]

In Europa wird sich nach derzeitigem Stand für das Hybridfahrzeug nur ein kleiner Markt ergeben, weil hier ein etablierter Dieselmotor von ca. 50 % mit weiteren Potenzialen zur Reduzierung der Emissionsgrenzwerte vorzufinden ist [95]. Es zeigt sich, dass die europäischen Automobilhersteller neben der Hybridentwicklung einerseits die Optimierung der Otto- und Dieselmotoren vorantreiben und andererseits alternative Lösungen wie beispielsweise synthetische Kraftstoffe oder Erdgasfahrzeuge einführen. Gerade die Weiterentwicklung der Ottomotoren wird durch spezielle Auflade- bzw. Bi-Turbosysteme, automatisierte Doppelkupplungsgetriebe, „strahlgeführte“ Piezo-Direkteinspritzung und Magerbetrieb dazu beitragen, dass der Kraftstoffbedarf und die Emissionen weiter sinken werden. Es wird hierbei erwartet, dass die EU-Abgasnormen bis zum Jahr 2015 für Diesel- und Ottomotoren die gleichen Emissionsgrenzwerte vorschreiben. [99]

Der Hybridantrieb bestehend aus Verbrennungsmotor und Elektromotor wird aller Voraussicht nach eine temporäre Übergangslösung auf dem Weg ins Wasserstoffzeitalter sein. [98] Aufgrund der Synergien bezüglich der Komponentenentwicklung wird dabei schon heute ein technologischer Vorsprung bei der Entwicklung eines zukünftigen hybriden Brennstoffzellenfahrzeugs erzielt. Die Hybridtechnologie wird dazu genutzt, um auf Modulebene Erfahrungen zu sammeln und mit anderen Herstellern Standardisierungen für zukünftige Fahrzeugplattformen zu schaffen. Dadurch können beispielsweise erprobte Batteriesysteme und Elektromaschinen ebenso in einem zukünftigen hybriden Brennstoffzellenfahrzeug integriert werden wie auch Hilfskomponenten wie z. B. unter anderem die Leistungselektronik und die Kühlsysteme. [57]

Laut [81] wird vor 2015 nicht mit einer nennenswerten Stückzahl an serienreifen Brennstoffzellen zu rechnen sein. Bisherige Brennstoffzellen seien abgesehen von den noch zu lösenden technischen Problemen für den Massen-Autobetrieb aufgrund zu hoher Kosten und zu geringer Lebensdauer noch nicht konkurrenzfähig. Neben der Brennstoffzelle wird der Wasserstoffmotor als ein weiteres Konzept von BMW untersucht. Parallel zur Entwicklung eines wasserstoffbetriebenen Antriebssystems ist eine adäquate Infrastruktur für Wasserstoff bestehend aus Einrichtungen für Erzeugung, Verteilung und Speicherung aufzubauen.

Um die Anforderungen an das Antriebs- und Batteriesystem hinsichtlich Effizienz, Fahrdynamik und Lebensdauer zu erfüllen, nimmt die Betriebsstrategie durch intelligente Regelungen bzw. Steuerungen der Energieflüsse in heutigen und zukünftigen Fahrzeugen eine zentrale Rolle ein. Es ist aber festzustellen, dass die derzeitigen implementierten Betriebsstrategien noch nicht das Optimum darstellen.

Gerade bei den Lade- und Entladevorgängen der Energiespeicher in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist noch ein hohes Potenzial erkennbar, weil hier beispielsweise die optimale Ausnutzung der Rekuperationsenergie oft dadurch verhindert wird,

dass die Energiespeicher bereits voll sind, um die gesamte Nutzenergie eines Bremsvorgangs oder einer Gefällstrecke aufnehmen zu können.

Diese Nachteile lassen sich durch Einbeziehung einer Leistungsprognose über den Fahrzyklus reduzieren. Durch eine derartige Prognose kann die Betriebsstrategie vorsteuernde Maßnahmen einleiten, die eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit und des Fahrkomforts ermöglichen. In dem folgenden Kapitel wird hierzu ein Konzept für die Prognose als Basis einer Betriebsstrategie vorgestellt.

3 Prognose als Basis für die Betriebsstrategie (L)

Die Leistungsprognose für die Optimierung der Energieerzeugung bzw. -verteilung hat sich in der Energiewirtschaft bei der Kraftwerkseinsatzplanung schon etabliert. Basierend auf der Leistungsprognose wird ein Einsatzplan erstellt, zu welchen Zeitpunkten die Kraftwerksblöcke an- bzw. abgefahren werden sollen. Dadurch soll ein kostengünstiger und energetisch effizienter Betrieb der Blöcke erreicht werden. Eine ähnliche Problemstellung liegt im Kraftfahrzeug vor, bei der die Betriebsstrategie entscheiden muss, welche Energieverteilung im Kfz für bestimmte Verkehrssituationen optimal ist.

Jede Prognose basiert prinzipiell auf Historiendaten, aus denen eine Struktur extrahiert wird. Von dieser Struktur wird angenommen, dass sie zeitlich invariant ist, so dass Daten prognostiziert werden können. Für die Prognose des Leistungsbedarfs werden in der Energiewirtschaft vorwiegend mathematische Verfahren eingesetzt. Ein häufig verwendetes Verfahren ist das Extrapolationsverfahren. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass die Prognose ausschließlich auf vergangene Werte der Zeitreihe basiert. Der Vorteil hierbei ist, dass die Abhängigkeiten zwischen Einflussgrößen und der Last nicht explizit untersucht werden müssen.

Die Prognose der erforderlichen Fahrzeugleistung ist nicht wie in der Energiewirtschaft anhand von aufgezeichneten Leistungsdaten möglich. Der Grund dafür ist, dass die Fahrzeugleistung einerseits unter anderem von der zu befahrenden Strecke und den Verkehrsverhältnissen abhängig ist und andererseits durch die Betriebsstrategie beeinflusst werden kann. Dadurch kann eine zeitliche Invarianz in den Leistungsdaten nicht gewährleistet werden und somit eine direkte Prognose mittels Extrapolationsverfahren nicht durchgeführt werden.

Ein alternativer Ansatz ist daher die Vorhersage der zukünftigen Fahr- bzw. Verkehrssituation wie beispielsweise die Geschwindigkeit, das Höhenprofil, Kurven, Kreuzungen, Ampeln mit Schaltphase und mögliche Störungen wie Stau bzw. Stop-and-Go-Verkehr, um daraus über die Fahrwiderstände die zukünftigen Leistungsanforderungen für das Fahrzeug abzuleiten. Die Vorhersage der Fahr- bzw. Verkehrssituation kann dabei sowohl mit entsprechender Sensorik zur Fahrzeugumfelderfassung als auch mit gespeicherten Streckendaten erfolgen.

In den weiteren Abschnitten werden hierzu vorausschauende Fahrerassistenzsysteme und ein neuartiges Konzept der Fahrstreckenerkennung für die Prognose vorgestellt. Abschließend wird mittels Simulationen der Prognosenutzen durch die Fahrstreckenerkennung bewertet.

3.1 Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme

Die nächsten Abschnitte stellen eine Auswahl an aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen vor. Das besondere an diesen Systemen ist, dass sie durch Streckendatenbanken und Fahrzeugumfelderfassung eine Vorausschau auf den kommenden Streckenverlauf und die zu erwartende Verkehrssituation ermöglichen. Die Fahrzeugumfelderfassung kann einerseits über fahrzeuginterne Sensorik wie z. B. Laser, Radar oder bildverarbeitende Sensoren und andererseits über infrastrukturgestützte Datenquellen wie z. B. Verkehrsmessschleifen erfolgen. Die in den Datenbanken abgelegten Informationen sind streckenspezifisch, d. h. hier liegen Angaben von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Höhenprofile, Kurvenradien usw. für die Fahrstrecken vor.

3.1.1 Navigationssystem

Ein Navigationssystem bietet dem Fahrer Unterstützung bei der Orientierung in ihm unbekannten Gegenden. Hier reicht die Unterstützung bis zu einem Zielführungssystem mit automatischer Fahrtroutenberechnung. Diese Systeme berechnen unter Berücksichtigung von Stausituationen die optimale Strecke und ermitteln eine neue Routenführung, falls der Fahrer von seiner geplanten Route abgekommen ist.

Zur Positionsbestimmung werden die Daten des Ortungssystems mit den Daten der gespeicherten digitalen Karte abgeglichen. Das Ortungssystem besteht aus Radsensoren zur Ermittlung des Weges und einem Gyrometer zur Erfassung der Richtungsänderung. Weiterhin enthält es einen GPS-Empfänger zur Korrektur starker Sensorstörungen oder um nach Fahrten außerhalb der digitalen Karte wieder in das gespeicherte Straßennetz zurückzufinden.

Aktuelle digitale Karten umfassen Listen verfügbarer Orte mit Straßennamen und Hausnummern. Für Ziele wie Parkhäuser, Tankstellen, und Flughäfen existieren sogenannte Points-of-Interest Verzeichnisse. Die Karten der nächsten Generation werden zusätzliche Informationen wie Höhenprofile, Kurvenradien und Geschwindigkeitsbegrenzungen enthalten.

3.1.2 Adaptive Cruise Control

Das Adaptive Cruise Control (ACC) hält einen konstanten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch gezielte Brems- und Motoreingriffe ein. Das ACC kontrolliert mit einem Radar- oder Infrarotsensor mit Reichweiten bis zu 200 m das vor ihm liegende Umfeld. Aus der Detektion der reflektierten Signale ermittelt das ACC, in welcher Entfernung, in welcher Richtung und mit welcher Relativgeschwindigkeit sich vorausfahrende Fahrzeuge bewegen. Der Fahrer gibt hierbei den einzuhaltenen Abstand vor. Weiterhin definiert er eine Fahrgeschwindigkeit bei freier Fahrt, d.h. sobald sich im Messbereich des Radarsensors kein vorausfahrendes Fahrzeug mehr befindet, beschleunigt das ACC auf die eingestellte Geschwindigkeit.

3.1.3 Verkehrszeichenerkennung

Bei der Verkehrszeichenerkennung nimmt eine Kamera das Umfeld vor dem Fahrzeug auf und liefert die Daten an eine Auswertungselektronik, die nach Verkehrsschildern sucht und zusätzlich die Daten mit den Informationen des Navigationssystems abgleicht. Die Informationen der Verkehrszeichenerkennung werden dem Fahrer im Tacho oder im Head-up-Display eingeblendet. Weiterhin können diese Daten dem Adaptive Cruise Control mitgeteilt werden, der die Geschwindigkeit automatisch auf die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit reduziert. Die Firma Siemens VDO bringt hierzu das sogenannte Traffic Sign Recognition im Jahr 2008 in Serie.

3.1.4 Car to Car Communication

Die Car to Car Communication umfasst die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur. Diese Funksysteme basieren auf dem Standard IEEE 802.11, auch Wireless LAN genannt. Befindet sich ein Fahrzeug im Funkraum eines WLANs von einem anderen Fahrzeug, kann es automatisch eine Verbindung mit diesem Fahrzeug aufbauen. Gleichzeitig bildet ein Fahrzeug den Router und kann Nachrichten von anderen Fahrzeugen zu weiter entfernten Fahrzeugen senden. Als mögliche Applikationen seien folgende genannt [56]:

- Car to Car Personal Communication: Telefonieren, Chat, Kurzmitteilungen
- Car to Car Infrastructure Personal Communication: Bezahlen in Parkhäusern, Datendownload von Hotspots
- Car to Car Traffic Safety Communication: Notruf, Staumeldungen, Warnungen

- Car to Car Infrastructure Traffic Safety Communication: Kommunikation mit Ampeln, Verkehrsschildern oder Schranken, Download aktueller Verkehrsinformationen

Für die Car to Car Communication ist ein offener Industriestandard notwendig, an dem zur Zeit ein Konsortium aus sechs europäischen Automobilherstellern arbeitet. Darüber hinaus will das Konsortium die Zuteilung einer entsprechenden Funkfrequenz für diese Anwendungen vorantreiben, ebenso die Entwicklung von entsprechenden Send- und Empfangssystemen. Abbildung 3.1 zeigt die vom Konsortium festgelegten Meilensteine von 2005 bis 2010.

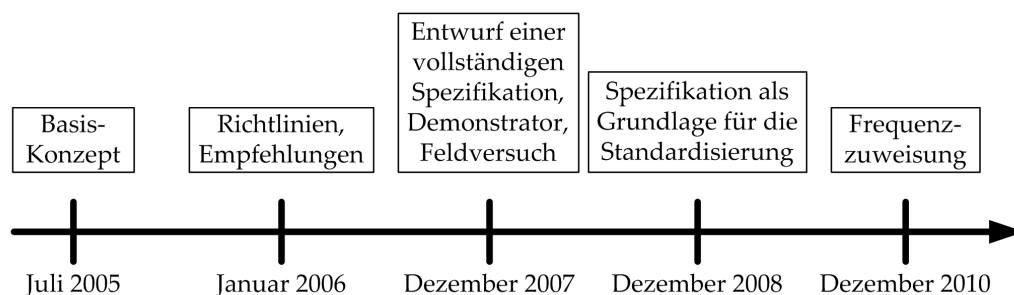


Abbildung 3.1: Meilensteine der Car to Car Communication

3.1.5 Bewertung

In mehreren Arbeiten ([19], [64], [32], [75]) wurden Konzepte für Betriebsstrategien basierend auf vorausschauenden Assistenzsystemen vorgestellt. Die Umsetzung dieser Strategien erfolgt vorwiegend durch eine Anpassung des Fahrers an die optimal berechnete Betriebsstrategie. Hierfür werden einerseits Anzeigekonzepte und andererseits haptische Rückmeldungen verwendet. Für eine haptische Rückmeldung hat BMW ein aktives Fahrpedal entwickelt, das mit einem variablen Druckpunkt ausgestattet ist, wodurch dem Fahrer eine bestimmte Fahrpedalstellung empfohlen werden kann. Bei den Anzeigekonzepten werden dem Fahrer Empfehlungen wie z. B. die Geschwindigkeit, verbrauchsoptimale Gangstufen und Gangwechselzeitpunkte über ein Display wiedergegeben.

Derartige vorausschauende Betriebsstrategien ermöglichen praxisrelevante Verbrauchsreduzierungen von mehr als 20%. [64] Dabei wird vorausgesetzt, dass der Fahrer sich ideal an die vorgegebene Betriebsstrategie hält. Ein Problem stellt hierbei nicht unbedingt die technische Realisierung dieser Systeme dar, sondern einerseits die Verfügbarkeit in allen Fahrzeugklassen und andererseits die Anpassung des Fahrers an die Betriebsstrategie. Die Integration von derartigen Assistenzsystemen

wird sehr wahrscheinlich aufgrund der Mehrkosten vorerst nur den Oberklassefahrzeugen vorbehalten sein und nicht zur Serienausstattung gehören. Da der Anteil der Oberklassefahrzeuge an den gesamten PKW-Neuzulassungen gering ist, wird der durch die vorausschauende Betriebsstrategie mögliche Nutzen zur Senkung der Verbrauchs- und Emissionswerte in der Flotte nicht signifikant sein.

Hinzu kommt, dass die Bedienung bzw. Aktivierung einiger Systeme wie z. B. das Navigationssystem durch den Fahrer erfolgt. Dadurch ist es möglich, dass gerade bei häufig gefahrenen und bekannten Strecken die Start-Zielführung des Navigationssystems eher nicht aktiviert wird, wodurch keine Vorhersagen über den weiteren Streckenverlauf mehr möglich sind. Außerdem ist bei einer derartigen Umsetzung der Betriebsstrategie zu berücksichtigen, wie der Fahrer die Empfehlungen aufnimmt und vor allem umsetzt.

Folglich sollten auch Konzepte erarbeitet werden, die eine Prognose ohne zusätzliche Fahrerassistenzsysteme und ohne einen Ausbau einer Infrastruktur für die Nahbereichskommunikation im Verkehrsnetz erlauben und somit kurzfristig in allen Fahrzeugklassen ohne hohe Zusatzkosten einsetzbar sind. Außerdem ist die Betriebsstrategie alternativ so umzusetzen, dass diese sich dem Fahrerverhalten anpasst und nicht umgekehrt.

3.2 Fahrstreckenerkennung

Ein mobiler Durchschnittsbürger in Deutschland legt nach einer Studie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen an einem Werktag ungefähr vier Wege mit dem Pkw zurück. [2] Die Wegezwecke bei der Fahrt sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Es wird daher angenommen, dass sich die meisten dieser Fahrten beispielsweise zur Arbeit, zum Einkaufen oder zur Freizeitaktivität wiederholen und somit auch die dazugehörigen Strecken häufig gefahren werden.

3.2.1 Konzept

Das Konzept der Fahrstreckenerkennung und Prognose beruht daher darauf, eine bereits in der Vergangenheit gefahrene Strecke anhand charakteristischer Streckeninformationen wieder zu erkennen und die ebenfalls zu den Strecken in einer Historiendatenbank gespeicherten Geschwindigkeits- und Höhenprofile als Prognose zu nutzen. Abbildung 3.3 verdeutlicht das Konzept des Prognosesystems und dessen Einbindung in die Betriebsstrategie zur Steuerung der Energieflüsse in einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb. Zur Erfassung der Streckeninformationen werden ausschließlich Sensorsignale verwendet, die serienmäßig in allen Fahrzeugklassen vorhanden

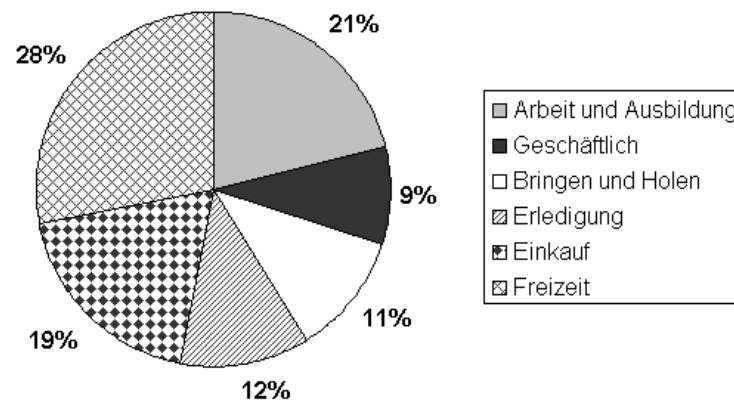


Abbildung 3.2: Wegezwecke in Deutschland

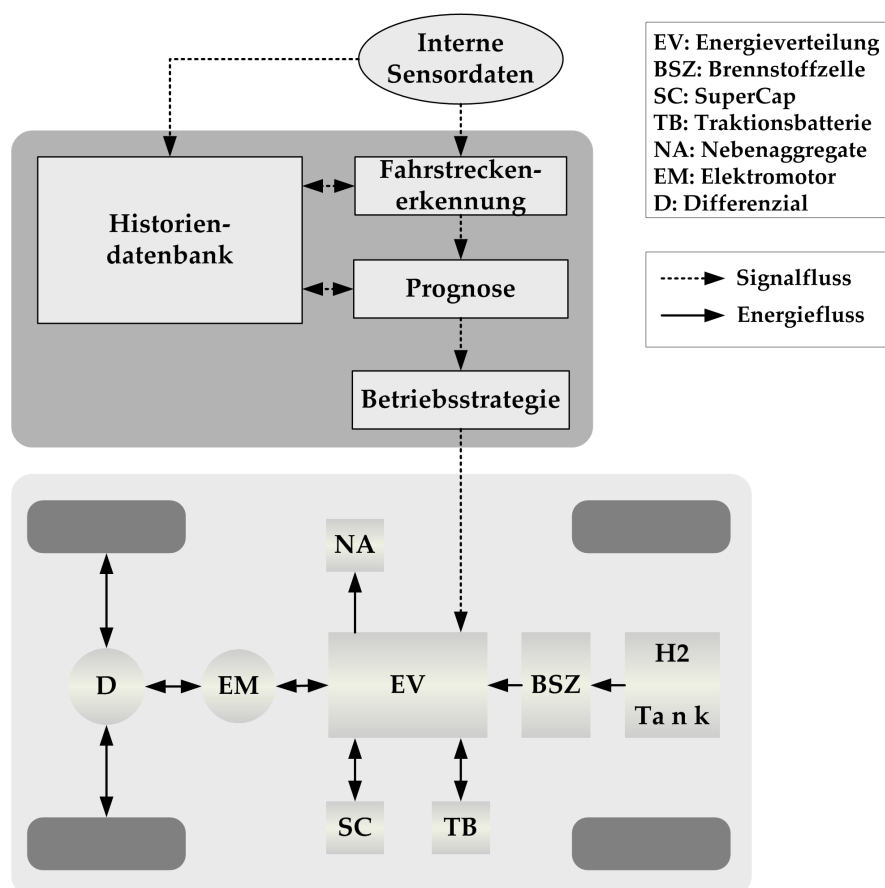


Abbildung 3.3: Systemkonzept der Fahrstreckenerkennung und Prognose für die Betriebsstrategie

sind. Nach Erkennung der Strecke werden die Prognoseinformationen der Betriebsstrategie zur Weiterverarbeitung übergeben.

Als internes Fahrzeugsensorsignal für die Fahrstreckenerkennung hat sich der Lenkwinkel über den Weg als geeignete Größe herausgestellt. Das Lenkprofil charakterisiert eine Strecke durch positive und negative Peaks abhängig von einer Rechts- bzw. Linkskurve. Die Kurvenlänge und der Kurvenradius werden durch die Dauer und Amplitude des Signals repräsentiert.

Abbildung 3.4 zeigt als Vergleich die Signalverläufe des Lenkwinkels über den Weg bei zwei Fahrten auf derselben Strecke. Das Signal wird über den Weg aufgetragen, um verkehrsbedingte zeitliche Verzerrungen des Lenkwinkelverlaufs über dieselbe Strecke zu vermeiden. Das Signal kann hier nur durch unterschiedliche Parkplatzwahl am Anfang oder Ende der Strecke gegeneinander verschoben sein, wie auch in Abbildung 3.4 dargestellt.

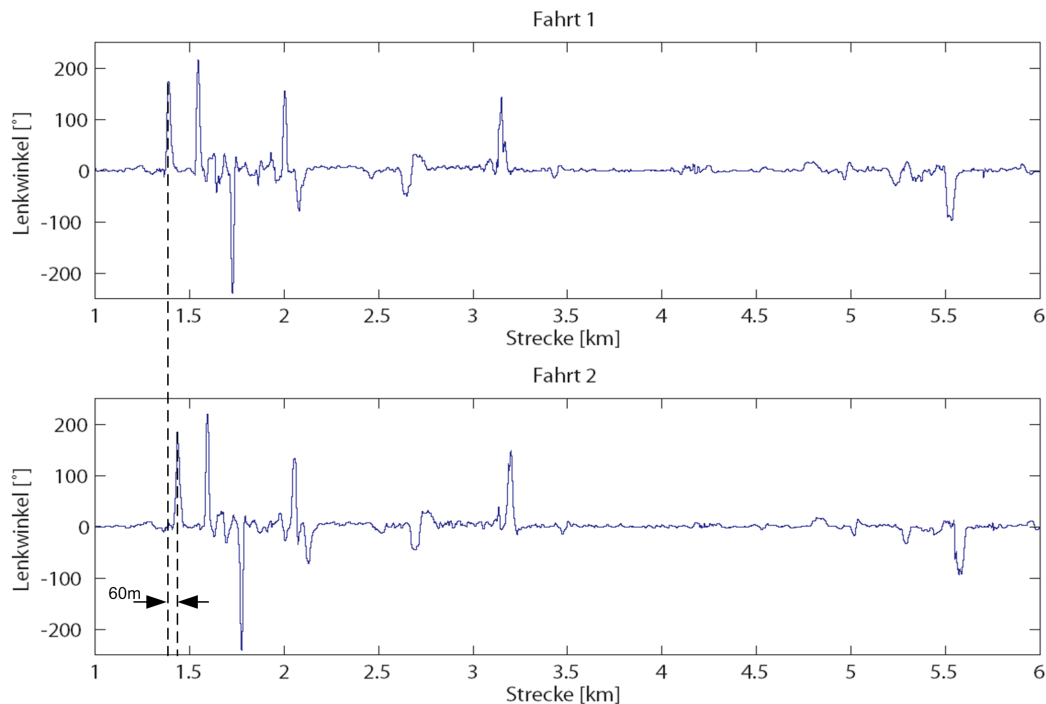


Abbildung 3.4: Lenkwinkelverläufe zweier Fahrten auf derselben Strecke

3.2.2 Aufnahme von Messdaten

Als Messfahrzeug stand ein VW Polo (Baujahr 2003) zur Verfügung. Es wurden insgesamt 115 Fahrten auf 25 unterschiedlichen Streckenprofilen mit Stadt-, Land-, und Autobahnanteilen durchgeführt. Die auf dem CAN-Bus des Fahrzeugs, auf den

im Abschnitt 4.1.3 näher eingegangen wird, zur Verfügung stehenden Messgrößen Lenkradwinkel, Geschwindigkeit und Zeit wurden über die CANalyzer-Software der Firma Vector eingelesen, gespeichert und weiterverarbeitet.

Das Höhensignal konnte aufgrund der fehlenden Sensorik im Messfahrzeug nicht aufgezeichnet werden. Dadurch sind in dieser Arbeit keine Aussagen über die Güte und den Nutzen der Prognose von Höhenprofilen möglich.

3.2.3 Digitale Signalanalyse

Innerhalb der digitalen Signalanalyse stehen mit der Korrelation und der Frequenzanalyse zwei Methoden zur Verfügung, die eine Bewertung der Ähnlichkeit zweier Signale ermöglichen. Die Korrelation erfolgt im Zeitbereich, wogegen bei der Frequenzanalyse das Signal über die Fourier-Transformation im Frequenzbereich untersucht wird.

3.2.3.1 Korrelation

Mit Hilfe der Korrelation lässt sich mathematisch die Ähnlichkeit zwischen zwei Signalen bestimmen. Es wird zwischen der Autokorrelation, wo das Signal mit sich selbst verglichen wird, und der Kreuzkorrelation, bei der zwei unterschiedliche Signale verglichen werden, unterschieden. Für die Fahrstreckenerkennung wird daher die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion verwendet, die durch die Formel

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=-N}^N x(n) \cdot y(n+k) \quad k = -(N-1) \dots (N-1) \quad (3.1)$$

bestimmt wird und damit die Ähnlichkeit zweier um k Abtastwerte verschobener Funktionen angibt. Hierbei stellt der Parameter k einen Wegversatz dar. Abbildung 3.5 zeigt die Kreuzkorrelationsfunktion von den Lenkradwinkelsignalen für zwei identische Strecken. Die Funktion hat hier ein Maximum von ca. 0,8 bei $k = -200$ m, was auf eine Verschiebung der Signale aufgrund einer anderen Parkplatzwahl zurückzuführen ist.

3.2.3.2 Fouriertransformation

Ein abgetastetes Signal lässt sich mit Hilfe der diskreten Fourier-Transformation in seine spektralen Bestandteile zerlegen. Für ein Signal $y(n)$ mit $n = 0 \dots N-1$ ergeben sich die Koeffizienten der diskreten Fourier-Transformation zu

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.2)$$

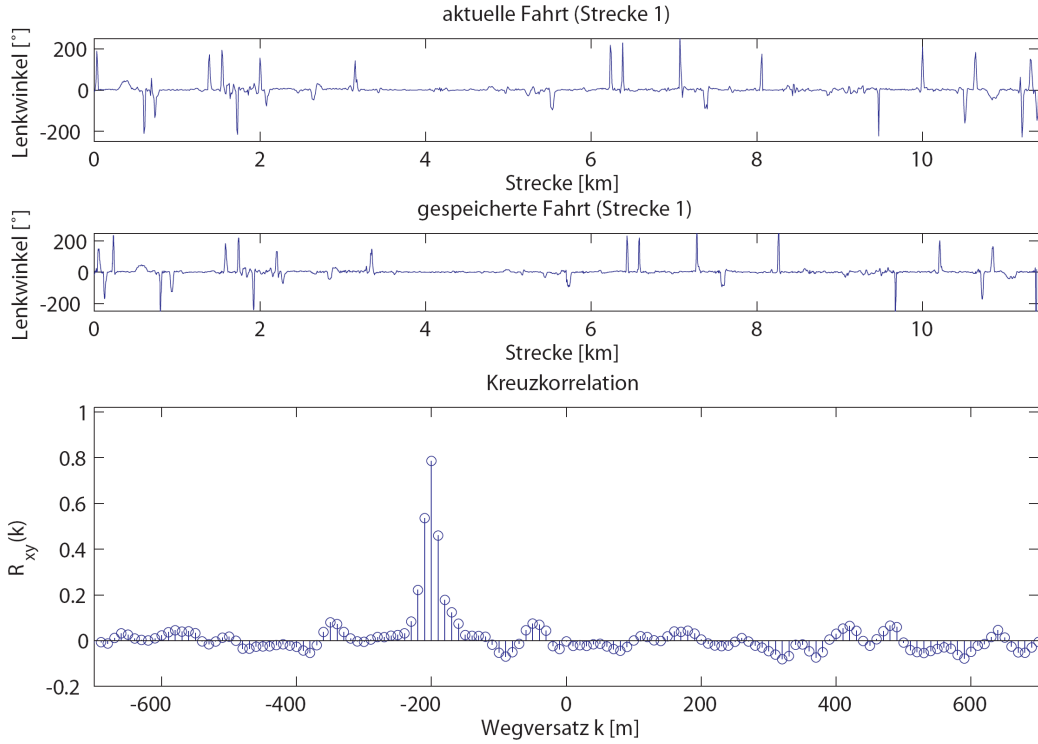


Abbildung 3.5: Korrelation zweier verschobener Lenkradwinkelsignale auf derselben Strecke

Für ein gleiches, aber zeitlich verschobenes Signal $y_v(n) = y(n - n_0)$ gilt entsprechend

$$Y_v(k) = Y(k) \cdot e^{-\frac{j2\pi kn_0}{N}}, \quad (3.3)$$

wobei n_0 dem zeitlichen Versatz entspricht. Die Fourierkoeffizienten der zeitlich verschobenen Signale unterscheiden sich somit nur durch einen komplexen Phasenfaktor. Folglich nimmt der Quotient aus $Q(k) = Y(k)/Y_v(k)$ genau folgende Form an:

$$p = e^{\frac{j2\pi kn_0}{N}} \quad (3.4)$$

Durch die Berechnung der Quotienten $Q(k+1)/Q(k)$ für alle k ist es möglich, n_0 zu bestimmen. Falls die beiden zu untersuchenden Signale bis auf einen zeitlichen Versatz identisch sind, erhält man folgenden Ausdruck:

$$\hat{p} = e^{\frac{j2\pi n_0}{N}} \quad (3.5)$$

Der Mittelwert der Argumente dieser Quotienten ergibt den Versatz n_0 .

$$n_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{N}{2\pi} \cdot \arg \left(\frac{Q(k+1)}{Q(k)} \right) \quad (3.6)$$

Ein Bewertungsmaß S für die Ähnlichkeit der beiden Signale kann dabei die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den einzelnen Argumenten und dem Mittelwert darstellen:

$$S = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{N}{2\pi} \cdot \arg \left(\frac{Q(k+1)}{Q(k)} \right) - n_0 \right)^2 \quad (3.7)$$

3.2.3.3 Bewertung

Die oben gemachten Ausführungen zeigen, dass die Methoden der digitalen Signalanalyse wie die diskrete Fouriertransformation (DFT) und die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) für den Vergleich von Lenkradwinkelsignalen grundsätzlich anwendbar sind. Es wurde hierbei aber vorausgesetzt, dass der Vergleich der Signale erst offline nach der Fahrt durchgeführt wird. Da die Fahrstreckenerkennung aber schon online während der Fahrt das aktuelle Lenkradwinkelsignal mit anderen gespeicherten Signalen vergleichen muss, um eine bereits gefahrene Strecke wieder zu erkennen und eine Prognose für die Betriebsstrategie einzuleiten, führt dies zu einem erheblichen Rechenaufwand. Weiterhin ist zu beachten, dass die Signale einerseits zeitäquidistant abgetastet und andererseits wegäquidistant verglichen werden müssen, woraus ein zusätzlicher Aufwand in der Verarbeitung der Daten entsteht.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit in [34] sowohl für die DFT als auch für die KKF ein Online-Algorithmus entwickelt und umgesetzt. Die Verifizierung der Online-Algorithmen zeigte zwar auf der einen Seite eine deutliche Steigerung der Rechenleistung, aber auf der anderen Seite Probleme bei der Identifizierung von gleichen Signalverläufen. Es hat sich sowohl bei der Online-DFT als auch bei der Online-KKF als schwierig herausgestellt, übereinstimmende und abweichende Signalverläufe durch ein geeignetes Bewertungsmaß eindeutig voneinander zu trennen und somit eine sichere Erkennung zu gewährleisten.

Aus diesem Grund wurden die streng mathematischen Methoden durch subjektive Bewertungsmethoden ersetzt. Dazu wurde die Mustererkennung herangezogen, deren Anwendbarkeit für die Fahrstreckenerkennung im Folgenden diskutiert wird.

3.2.4 Mustererkennung

Die Mustererkennung bezeichnet das maschinelle Erkennen und Auswerten von Mustern in Signalen. Ein klassisches Beispiel der Mustererkennung ist die Spracherkennung. Das gesprochene Wort ist Bestandteil eines eindimensionalen akustischen Signals. Die Aufgabe der Mustererkennung besteht darin, die Laute, Wörter und

Sätze der Sprache zu identifizieren. Dabei wird das Signal mit geeigneten Methoden so bearbeitet, dass die relevanten Informationen aus dem Signal extrahiert werden. Anschließend wird die Übereinstimmung der Nutzinformationen mit bekannten Mustern überprüft. Auf Grundlage der Mustererkennung wird im Folgenden ein Lösungsweg für die Fahrstreckenerkennung aufgezeigt.

3.2.4.1 Merkmalextrahierung

Die Strecke kann mit Hilfe des Lenkradwinkelsignals, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, durch das Vorzeichen und die Größe des Lenkradeinschlags Δh_{kurve} , die Kurvenlänge Δs_{kurve} und den Abstand zwischen zwei Kurven Δs_{gerade} identifiziert werden. Die Amplituden des Lenkradwinkels sind bei Geradeausfahrt im Vergleich zur

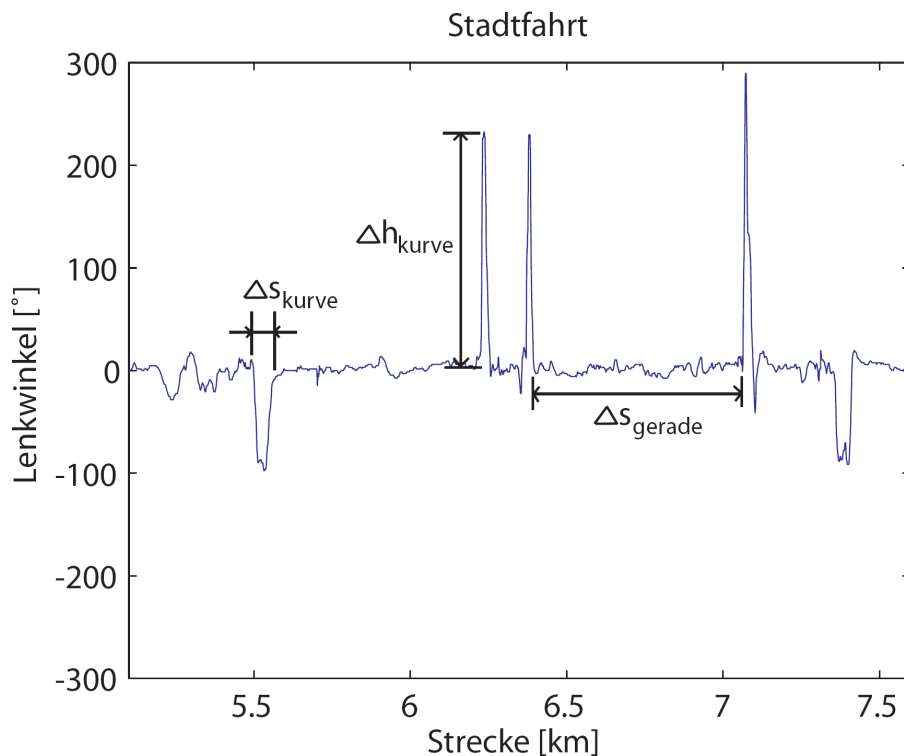


Abbildung 3.6: Charakteristische Merkmale des Lenkradwinkelsignals über einen Fahrzyklus

Kurvenfahrt relativ gering und verrauscht. Sie liefern keine relevanten Informationen zur Identifikation der Strecke und müssen daher nicht für die gesamte Geradeausfahrt separat betrachtet und gespeichert werden. Um dies zu erreichen, ist die Definition von Schwellwerten notwendig, die kleine Lenkradwinkel unterdrücken.

Dagegen ist die Darstellung der Kurve bei der Fahrstreckenerkennung von Bedeutung. Laut den Richtlinien für die Anlage von Straßen-Linienführung besteht jede Kurve aus einem Kreisbogen konstanter Krümmung und zwei Übergangsbögen für die Ein- und Ausfahrt.

Für die Fahrstreckenerkennung ist aber eine exakte Nachbildung des Kurvenverlaufs nicht notwendig, so dass eine Approximation ausreichend ist. Eine Möglichkeit ist, die Kurve durch ein Polynom n -ten Grades anzunähern. Die Polynomkoeffizienten dienen dann als Vergleichsmaß zweier Kurven. Eine weitere Möglichkeit ist, die Kurve entweder durch den maximalen Lenkradwinkel oder den mittleren Lenkradwinkel und die dazugehörige Kurvenlänge abzubilden. Die Polynomialapproximation liefert hier die beste Annäherung. Es stellt sich aber ein erhöhter Aufwand bei der Fahrstreckenerkennung unter Berücksichtigung der Polynomkoeffizienten ein.

Daher wird der mittlere Lenkradwinkel als Kurvenapproximation, wie in Abbildung 3.7 verdeutlicht, angewendet, obwohl der maximale Lenkradwinkel eine bessere Approximation liefert. Der Grund hierfür ist, dass durch den mittleren Lenkradwinkel nicht-streckentypische Ausreißer im Signal geglättet werden und somit diese bei der Fahrstreckenerkennung nicht so stark gewichtet sind.

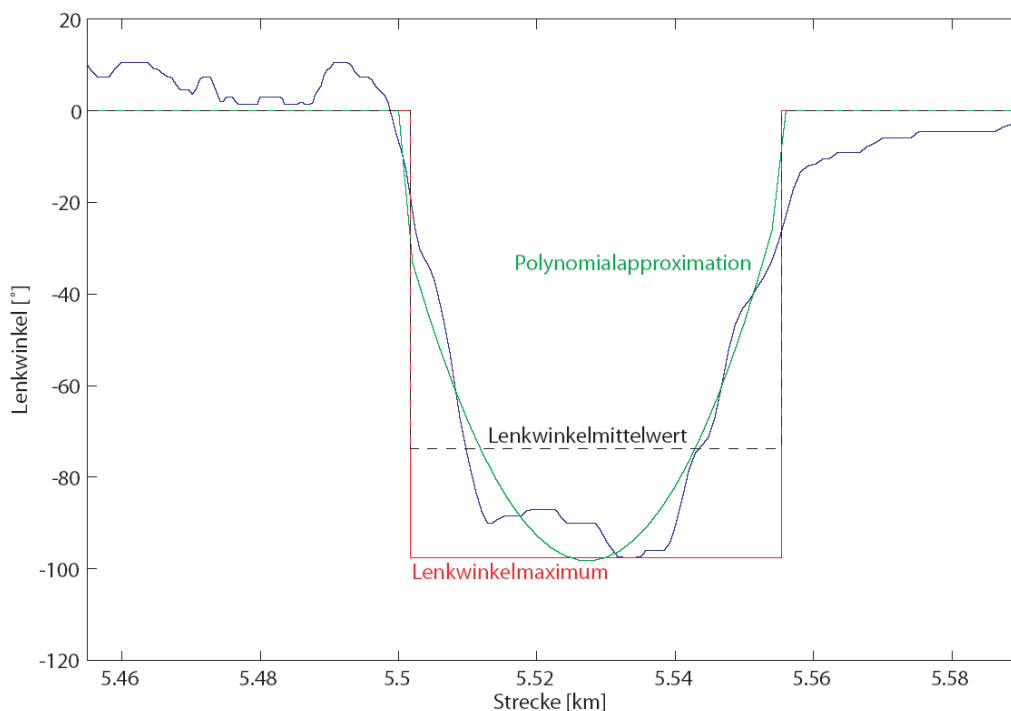


Abbildung 3.7: Approximation des realen Lenkwinkelsignals

Die hier dargestellte Merkmalsextrahierung für die Fahrstreckenerkennung wurde mit dem folgenden Algorithmus umgesetzt:

- Anlegen eines zweidimensionalen Vektors für die Streckenlänge und den Lenkwinkel
- Definition von Schwellwerten für die Extrahierung von Kurven bzw. Unterdrückung nicht relevanter Lenkradwinkelausschläge während eines geraden Streckenabschnitts
- Markierung des Beginns eines geraden Streckenabschnitts mit der bis dahin zurückgelegten Streckenlänge und dem Lenkwinkel 0°
- Bestimmung der bis zur Kurve zurückgelegten Strecke und des mittleren Lenkradwinkels der Kurve nach Durchfahren der Kurve

Die Größe des Vektors ist somit nicht abhängig von der Fahrtlänge, sondern nur von der Anzahl der extrahierten Kurven. Hierdurch wird eine erhebliche Reduktion des Datenvolumens auf die relevanten Informationen erreicht. Die mit Messfahrten aufgenommenen Daten haben im Mittel 13.330 Samples pro Fahrt. Im Lenkwinkelvektor sind dagegen weniger als 27 Einträge pro Spalte verzeichnet, woraus unter Berücksichtigung der zweidimensionalen Einträge eine Reduktion der zu speichernden Daten um den Faktor 250 resultiert.

3.2.4.2 Güte der Extrahierung

Die Güte der Extrahierung von Lenkradwinkelmerkmalen hängt von der Wahl der Parameter ab, nach denen ein Lenkradwinkel als tatsächliche Kurvenfahrt oder als nicht-streckentypische Handlung bewertet wird. Eine nicht-streckentypische Handlung kann zum Beispiel das Umfahren eines parkenden Fahrzeugs sein, was zu Fehlinformationen in der Vektortabelle führt. Lenkbewegungen bei höheren Geschwindigkeiten wie unter anderem beim Überholen, die erfahrungsgemäß einen kleineren Lenkradwinkel hervorrufen, werden dagegen nicht in die Vektortabelle aufgenommen.

Weitere Fehlinformationen können auftreten, falls Kurvenverläufe sich nahe an der Parameterschwelle für die Extrahierung befinden. Da der Verlauf des Lenkradwinkels für dieselbe Kurve von Fahrt zu Fahrt ein wenig variieren kann, ist es möglich, dass die Kurve bei einer Fahrt als relevant identifiziert und somit extrahiert wird und bei einer anderen Fahrt nicht. Die Fehlinformationen können einerseits durch eine geeignete Wahl an Parametern minimiert werden, wofür weiterführende Messfahrten notwendig sind, andererseits durch den Erkennungsalgorithmus selbst in gewissen Umfängen erkannt und verworfen werden.

3.2.4.3 Erkennungsalgorithmus

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Erkennungsalgorithmus vergleicht die in Abbildung 3.8 exemplarisch dargestellten approximierten und extrahierten Lenkradwinkelsignale, indem das Vorzeichen, die Höhe und Länge der Amplitude und die Abstände zwischen diesen analysiert werden. Der Algorithmus startet die Prüfung

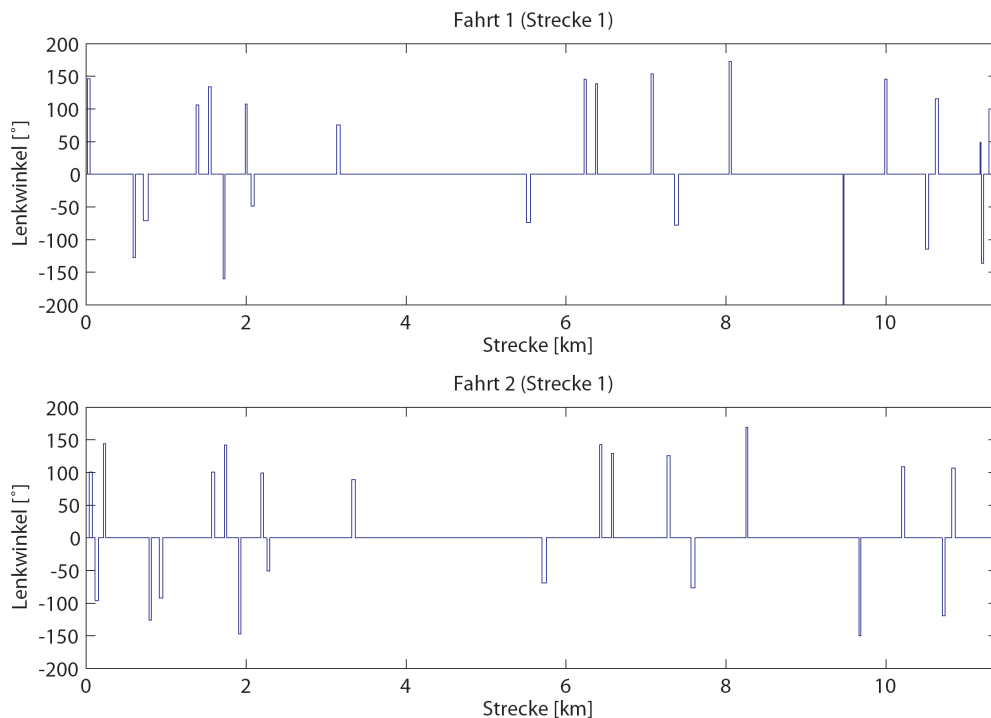


Abbildung 3.8: Approximierte und extrahierte Lenkradwinkelsignale zweier Fahrten auf derselben Strecke

während der aktuellen Fahrt erst dann, wenn zwei Kurven detektiert worden sind. Dabei bleibt der Vergleich nicht auf die ersten beiden Kurven der in der Historiendatenbank abgelegten Strecken beschränkt, da durch die Parkplatzwahl Unterschiede am Anfang der Fahrt gegeben sein können.

Um die Güte der Fahrstreckenerkennung zu erhöhen, können mehrere Kurven und Geradeausstrecken der Prüfung unterzogen werden. Hieraus resultiert der Nachteil, dass erst eine längere Wegstrecke gefahren sein muss, bevor der Algorithmus eine mögliche Erkennung ausgibt. Folglich ist ein Kompromiss zwischen frühzeitiger Erkennung und Güte der Erkennung notwendig. In dem durch Messfahrten gewonnenen Datensatz hat sich dabei eine gute Erkennung bei der Analyse zweier zurückliegender Kurven und dem dazwischen liegenden Streckenabschnitt ergeben.

Abbildung 3.9 zeigt den grundsätzlichen Ablauf des Erkennungsalgorithmus, der bei der Detektion einer neuen Kurve aufgerufen wird. Als erstes wird dann über-

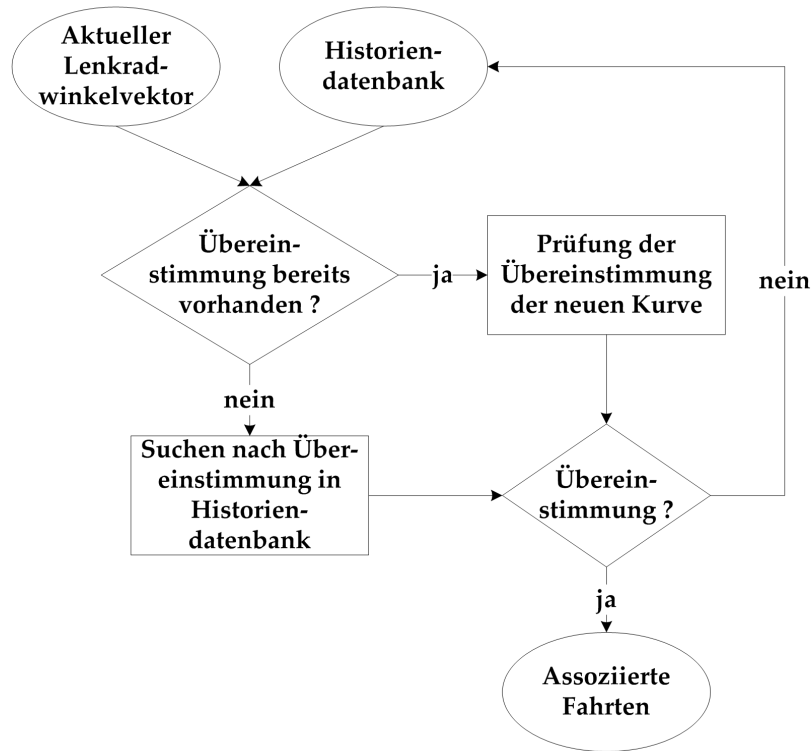


Abbildung 3.9: Ablaufdiagramm des Erkennungsalgorithmus

prüft, ob schon vorher Übereinstimmungen zwischen den gespeicherten Fahrten in der Datenbank und dem aktuellen Lenkradwinkelvektor vorlagen. Ist dies nicht der Fall, werden die zwei zurückliegenden Kurven und der dazwischen liegende Streckenabschnitt der aktuellen Strecke mit denen der gespeicherten Strecken anhand von folgenden drei Kriterien verglichen.

- Vorzeichenprüfung der Amplituden des approximierten Lenkradwinkels
- Vergleich der Amplitudenhöhe des approximierten Lenkradwinkels
- Vergleich des zurückgelegten Weges zwischen zwei Kurven

Für jedes Kriterium erfolgt eine aus dem relativen Fehler abgeleitete Bewertung mit $r_{\text{kriterium}} \in \{0..1\}$, wobei $r = 1$ Übereinstimmung und $r = 0$ keine Übereinstimmung bedeutet. Die Bewertung der Kriterien kann zusätzlich unterschiedlich gewichtet und zu einem Ähnlichkeitskoeffizienten r_{gesamt} zusammengefasst werden. Dieser ermöglicht ein Bewertungsmaß für die Erkennung von bereits gefahrenen Strecken.

Nach Prüfung der Kriterien werden die erkannten Strecken aus der Datenbank markiert und der Ähnlichkeitskoeffizient zusätzlich ausgegeben. Falls bereits eine vorherige Übereinstimmung festgestellt wird, dann wird im Weiteren nur noch die neue Kurve und die davor liegende gerade Strecke geprüft.

3.2.4.4 Fehlerdiskussion

Der Erkennungsalgorithmus kann nicht alle durch nicht-streckentypische Lenkbewegungen verursachten Fehlinformationen im Lenkradwinkelvektor abfangen. Wird beispielsweise bei den Fahrten auf derselben Strecke eine Kurve das eine Mal detektiert und das andere Mal nicht, weil ihre Charakteristik sich nahe an der Klassifikationsgrenze befindet, so werden diese Fahrten jeweils unter einer neuen Strecke abgelegt. Folglich hat man mehrere Einträge in der Historiendatenbank, obwohl es sich um dieselbe Strecke handelt. Hierdurch ist ein Anwachsen der Datenbank und damit des Speicherbedarfs gegeben. Die Funktionalität des Erkennungsalgorithmus wird dabei aber nicht beeinträchtigt.

Eine weitere Fehlinformation kann durch eine unvorhergesehene, einmalig auftretende Lenkbewegung hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wartet der Erkennungsalgorithmus bis zu der nächsten Kurvendetektion ab und vergleicht dann das Lenkradwinkelprofil unter Weglassen der vermeintlich nicht-streckentypischen Lenkradwinkelamplitude. Liefert die Übereinstimmungsprüfung einen Ähnlichkeitskoeffizienten nahe 1, so kann von einer Fehlinformation ausgegangen werden. Die Fehlinformation wird aus dem Vektor gelöscht und der Erkennungsalgorithmus wird wie oben beschrieben fortgesetzt. Mehr als eine Fehlinformation zwischen zwei streckentypischen Kurven kann vom Algorithmus nicht abgefangen werden und führt somit zu einem neuen Streckeneintrag in der Datenbank.

Ein weiteres Problem kann auftreten, falls am Anfang der Strecke ein kilometerlanger gerader Wegabschnitt vorliegt, wodurch keine Kurven detektiert werden und somit keine weiteren Informationen für die Fahrstreckenerkennung verfügbar sind. Folglich wird die Datenbank nicht überprüft und es kann keine frühe Erkennung der Strecke durchgeführt werden.

3.2.4.5 Bewertung

Insgesamt konnten mit dem Erkennungsalgorithmus basierend auf dem vorhandenen realen Datensatz verlässliche Aussagen über gleiche oder sich unterscheidende Strecken getroffen werden. Beim Vergleich jeder Fahrt mit den übrigen gespeicherten Fahrten in der Historiendatenbank hat sich eine Erkennungsquote von über 80% ergeben. Für eine verlässliche Erkennung mussten dabei mindestens zwei Kurven

detektiert worden sein. Die in der Datenbank enthaltenen Streckendaten mit einer durchschnittlichen Fahrtlänge von 22 km erlaubten eine Erkennung nach ca. 5 % der Gesamtstrecke. Weiterhin ist anzumerken, dass die Funktionalität des Algorithmus durch Fehlinformationen nicht eingeschränkt wird. Fehlinformationen führen, soweit sie nicht vom Algorithmus abgefangen werden, nur zu weiteren Einträgen in der Historiendatenbank.

3.2.5 Geschwindigkeitsprognose

Das vorherzusagende Geschwindigkeitssignal ist, wie in Abbildung 3.10 für eine Stadtfahrt über die Streckenlänge verdeutlicht, durch Stopp-, Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Konstantphasen gekennzeichnet. Das Auftreten dieser Phasen ist im Wesentlichen abhängig von den Streckeneigenschaften, dem Verkehrsaufkommen und der Verkehrsinfrastruktur. Der Fahrer hat dabei einen erheblichen Einfluss auf die Größe der Beschleunigung und Verzögerung und der maximalen Geschwindigkeit. In Abbildung 3.10 wird weiterhin deutlich, dass der Fahrer die Geschwindigkeit über längere Wegstrecken nicht konstant halten kann. In diesem Beispiel bewegt sich die Geschwindigkeit sowohl in dem Streckenabschnitt ab 3,2 km bis 4,1 km als auch ab 4,25 km bis 5,4 km zwischen 50 km/h und 60 km/h.

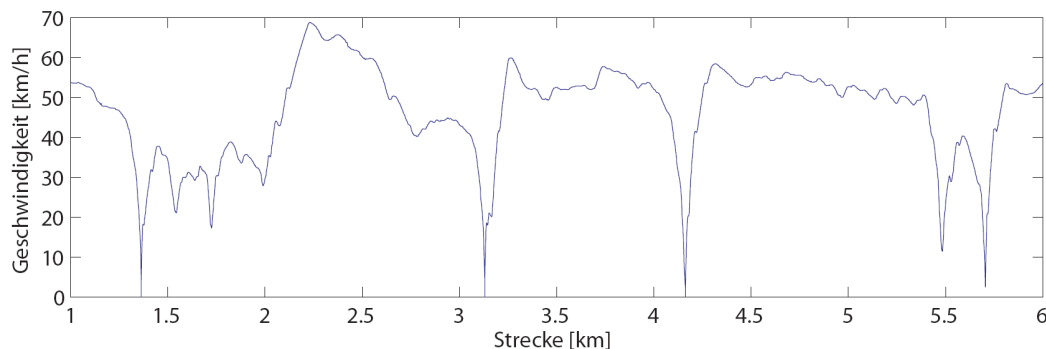


Abbildung 3.10: Geschwindigkeitsverlauf einer Stadtfahrt

3.2.5.1 Quantisierung

Für die Berechnung einer Geschwindigkeitsprognose hat sich eine Quantisierung in 10 km/h-Schritten als ausreichend herausgestellt, wobei die Zugehörigkeit eines Abtastwertes zu einer Klasse durch ein ± 5 km/h Band definiert ist. Abbildung 3.11 zeigt hierzu das quantisierte Geschwindigkeitssignal einer Stadtfahrt. Der mittlere Quantisierungsfehler liegt hier bei 2,5 km/h.

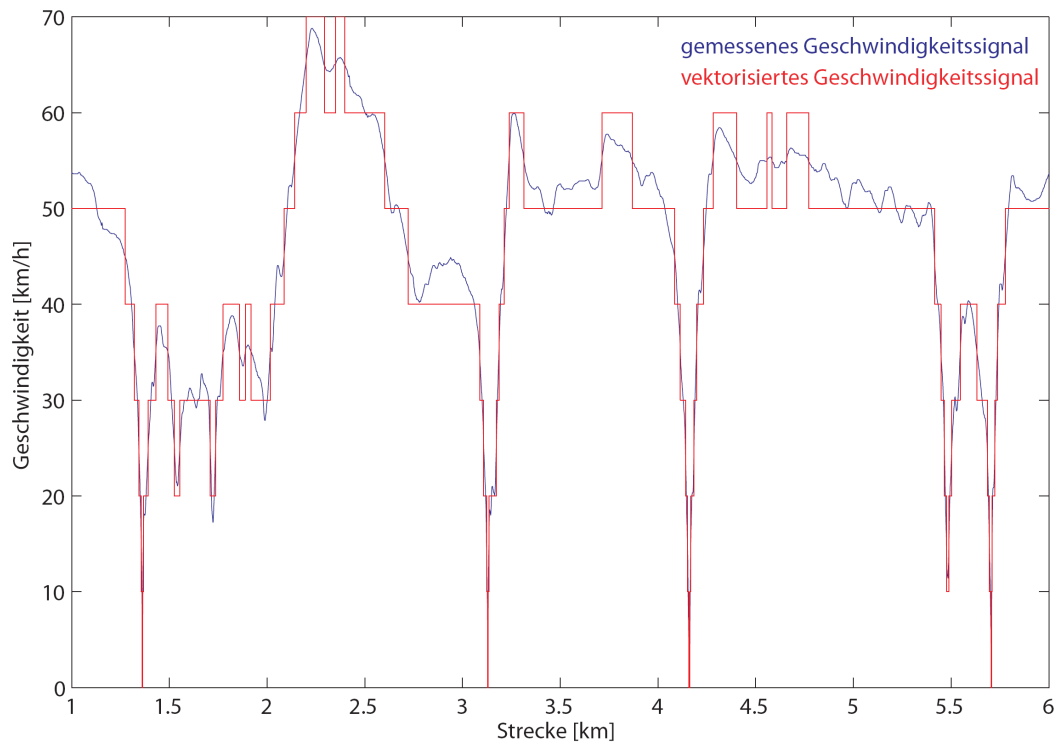


Abbildung 3.11: Quantisierung des realen Geschwindigkeitsverlaufs

Das quantisierte Geschwindigkeitssignal wird ähnlich wie das Lenkwinkelsignal in einem zweidimensionalen Vektor gespeichert. Es wird hierbei nur beim Sprung in eine andere Geschwindigkeitsstufe die aktuelle Wegstrecke und die dazugehörige diskretisierte Geschwindigkeit gespeichert. Tabelle 3.1 zeigt einen Auszug des Geschwindigkeitsvektors basierend auf dem in Abbildung 3.11 dargestellten Profil, deren Größe unabhängig von der Fahrzeit ist. Die Vektorgröße wird im Wesentlichen durch die Dynamik des Geschwindigkeitssignals bestimmt, so dass eine Stadtfahrt mit vielen Anfahr- und Stopp-Phasen mehr Einträge verursacht als eine längere Autobahn- bzw. Überlandfahrt mit nahezu konstantem Geschwindigkeitsprofil. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von 13.330 Abtastwerten pro Fahrt in dem vorliegenden Datensatz ist eine Datenreduktion um den Faktor 37 in dem Geschwindigkeitsvektor realisierbar.

3.2.5.2 Ausgabe der Prognose

Bei Erkennung einer Strecke soll basierend auf den dazugehörigen gespeicherten Geschwindigkeitsvektoren eine repräsentative Geschwindigkeitsprognose für den Rest der Strecke ausgegeben werden. Mögliche singuläre Ereignisse wie z. B. ein unerwarteter Fahrzeugstopp bedingt durch die Verkehrssituation in einem der gespei-

Strecke	Geschwindigkeit
⋮	⋮
1,90 km	30 km/h
2,00 km	40 km/h
2,08 km	50 km/h
2,12 km	60 km/h
2,16 km	70 km/h
⋮	⋮

Tabelle 3.1: Vektor mit quantisierten Geschwindigkeiten für die Prognose

cherten Geschwindigkeitsvektoren dürfen dabei so wenig wie möglich ins Gewicht fallen. Eine Methode zur Bestimmung eines prognostizierten Geschwindigkeitsprofils ist die Mittelwertbildung aus allen Profilen zu der erkannten Strecke. Da jedoch der Speicherbedarf ein wichtiges Kriterium für ein Kfz-Steuergerät ist, wird von einer niedrigen Anzahl von gespeicherten Profilen ausgegangen. Folglich wird über die Mittelwertbildung nicht immer die bestmögliche Prognose erzielt, weil die singulären Ereignisse bei einer geringen Anzahl an Geschwindigkeitsvektoren noch zu stark gewichtet werden.

Aus diesem Grund wurde für die Geschwindigkeitsprognose eine wahrscheinlichkeitsbasierte Methode angewendet. Dabei wird aus den jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren für jeden gespeicherten Wegpunkt die am häufigsten vorkommende Geschwindigkeit ausgewählt. Falls zu einem Wegpunkt mehrere Geschwindigkeiten die gleiche Wahrscheinlichkeit haben, dann wird diejenige Geschwindigkeit ausgewählt, die der für den vorherigen Wegpunkt am nächsten liegt. Dadurch wird unter anderem gewährleistet, dass der Übergang zwischen den Geschwindigkeitsstufen reduziert wird.

Die Berechnung der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit erfolgt jeweils bei den Geschwindigkeitsänderungen. Da aber in den Geschwindigkeitsprofilen die Sprungstellen der Geschwindigkeit an verschiedenen Wegpunkten auftreten können, kann es vorkommen, dass redundante Informationen in den wahrscheinlichkeitsbasierten Geschwindigkeitsvektor geschrieben werden, die nachträglich durch den Algorithmus gelöscht werden.

Neben der zukünftigen Geschwindigkeitsentwicklung auf der erkannten Strecke kann für die Betriebsstrategie explizit die Brems- und Beschleunigungsphase relevant sein, worauf im Abschnitt 3.3 bei der Bewertung des Prognosenutzens detaillierter

eingegangen wird. Zur Abschätzung des Prognosenutzens innerhalb einer Betriebsstrategie sollen aus energetischen Gründen größere Geschwindigkeitsgradienten zur Prognose herangezogen werden, wodurch in dem vorhergesagten Geschwindigkeitsvektor alle Geschwindigkeitsänderungen größer gleich ± 20 km/h und kleiner gleich 20 s ausgegeben werden. Diese Geschwindigkeitsänderungen beruhen auf heuristischen Annahmen. Abbildung 3.12 zeigt für eine ausgewählte Strecke mit Autobahnanteil das gemessene Geschwindigkeitsprofil, das prognostizierte quantisierte Geschwindigkeitsprofil und die dazugehörigen vorhergesagten Geschwindigkeitsgradienten.

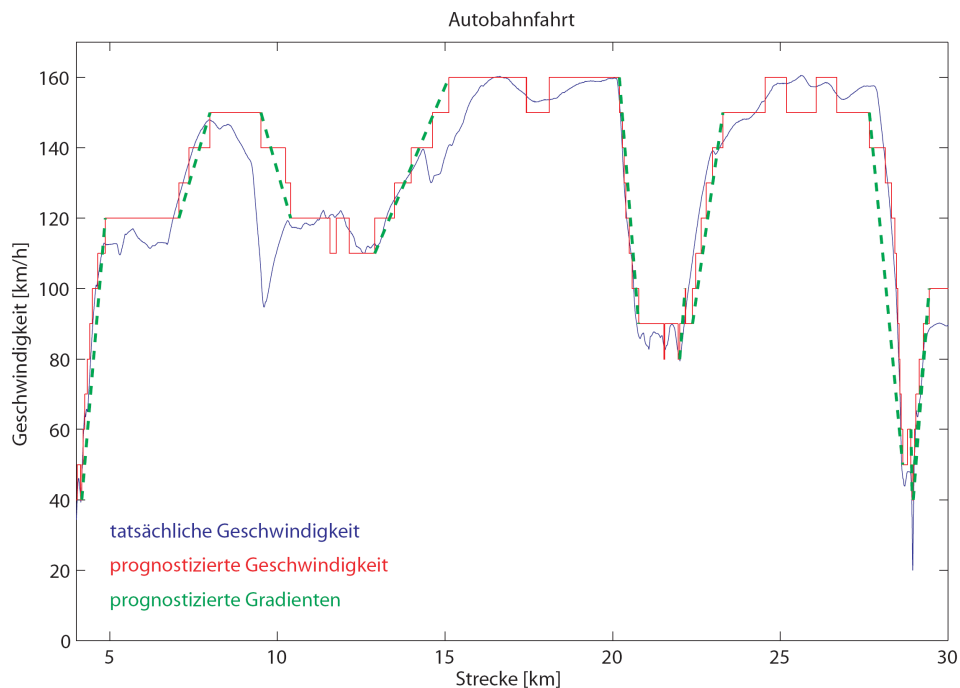


Abbildung 3.12: Prognostizierter quantisierter Geschwindigkeitsverlauf und vorhergesagte Geschwindigkeitsgradienten

Da der Vektor für die Geschwindigkeitsprognose wegbasiert vorliegt und die Betriebsstrategie zeitbasiert arbeitet, wird der Vektor vor der Übergabe in die Betriebsstrategie auf eine zeitliche Basis gebracht. Der Vektor mit dem prognostizierten Geschwindigkeitsgradienten hat daraufhin folgende Einträge:

- t_{grad} : Zeit bis zum Eintreten des Geschwindigkeitsgradienten
- v_{start} : Geschwindigkeit am Anfang des Gradienten
- v_{ende} : Geschwindigkeit am Ende des Gradienten
- Δt : Zeitraum der Geschwindigkeitsänderung

Die Zeit t_{grad} wird im ersten Schritt basierend auf dem bis zum Eintreten des ersten Gradienten prognostizierten Geschwindigkeitsprofil bestimmt. Im weiteren Verlauf wird t_{grad} unter Berücksichtigung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit aktualisiert, wenn die aktuelle Geschwindigkeit von der vorhergesagten abweicht.

3.2.5.3 Prognosegüte

Um ein Bewertungsmaß für die Güte der Prognose zu erhalten, wird nach jeder Fahrt die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{xy}(t)$ zwischen dem vorhergesagten und dem tatsächlichen vektorisierten Geschwindigkeitsprofil berechnet. Für die Bewertung der Güte ist dabei nur die Ähnlichkeit beider Signale ohne gegenseitige Verschiebung, d.h. $R_{xy}(t = 0)$, relevant. In dem zugrunde liegenden gemessenen Datensatz hat sich unter den Voraussetzungen von fünf assoziierten Fahrten auf derselben Strecke und einer sicheren Fahrstreckenerkennung eine durchschnittliche Prognosegüte von $R_{xy}(t = 0) = 0,88$ ergeben.

Die Prognosegüte kann durch Berücksichtigung der Ursachen für unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile auf derselben Strecke erhöht werden. Diese unterschiedlichen Profile können beispielsweise durch zeitbedingtes höheres Verkehrsaufkommen oder witterungsbedingte Verschlechterung des Fahrbahnbelags verursacht werden. Man kann davon ausgehen, dass normalerweise die Fahrt morgens im Berufsverkehr ein anderes Geschwindigkeitsprofil ergibt als die Fahrt auf derselben Strecke zur Mittagszeit. Folglich kann eine Klassifizierung der Geschwindigkeitsverläufe über einen Zeitstempel und weiteren Kriterien wie z. B. Jahreszeit oder Witterungsbedingungen zu einer Erhöhung der Prognosegüte führen.

3.2.6 Historiendatenbank

Die Historiendatenbank zur Speicherung der relevanten Streckeninformationen für die Erkennung und Prognose ist ein wesentlicher Baustein in dem hier vorgestellten Gesamtkonzept. Hierbei ist es wichtig, dass einerseits eine optimale Fahrstreckenerkennung und Prognose gewährleistet ist und andererseits der Speicherbedarf minimal ist.

3.2.6.1 Aufbau und Regenerierung

Die Historiendatenbank hat die in der Tabelle 3.2 dargestellte Matrixstruktur. Dabei werden in den Zeilen die verschiedenen Strecken und in den Spalten die zu der Strecke gehörenden Geschwindigkeitsprofile abgelegt. Das Festlegen einer optimalen Anzahl der zu speichernden Strecken und Geschwindigkeitsprofile kann nur über

umfangreiche und repräsentative Feldversuche erfolgen. In dieser Arbeit wurden ausgehend von der Studie [2] sechs typische Wegezwecke aus den Bereichen Einkauf, Freizeit, Erledigungen und Arbeit ausgewählt, so dass unter Berücksichtigung der Hin- und Rückfahrt die Mindestgröße der zu speichernden Strecken mit $l = 12$ festgelegt wurde. Basierend auf dem vorliegenden Datensatz hat sich bei $k=5$ der pro Strecke zu speichernden Geschwindigkeitsverläufe ein gutes Prognoseergebnis ergeben.

Fahrten pro Strecke [k]				
Strecken [l]	$Strecke1_{Fahrt1}$	$Strecke1_{Fahrt2}$	$Strecke1_{Fahrt3}$	\dots
	$Strecke2_{Fahrt1}$	$Strecke2_{Fahrt2}$	$Strecke2_{Fahrt3}$	\dots
	$Strecke3_{Fahrt1}$	$Strecke3_{Fahrt2}$	$Strecke3_{Fahrt3}$	\dots
	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots

Tabelle 3.2: Matrixstruktur der Historiendatenbank

Bei der Regenerierung der Historiendatenbank berücksichtigt die Ersetzungsstrategie für die Einträge folgende Aspekte:

- Vermeidung der Löschung von in naher Zukunft gefahrenen Strecken
- Löschung alter Einträge zur Vermeidung von Datenleichen

Bei der Regenerierung ist zwischen dem Ersetzen eines Eintrages für eine neue Strecke und für ein neues Geschwindigkeitsprofil einer bereits gespeicherten Strecke zu unterscheiden. Beim Eintrag eines neuen Geschwindigkeitsverlaufs besteht die Möglichkeit, entweder das älteste Profil oder ein zufällig ausgewähltes Profil zu ersetzen. Bei einer neuen Strecke sollte das zufällige Ersetzen in der Datenbank nicht durchgeführt werden, um nicht möglicherweise häufig gefahrene Strecken zu löschen. Daher ist es sinnvoller, die Strecke zu ersetzen, die am längsten nicht durch ein neues Geschwindigkeitsprofil aktualisiert wurde.

3.2.6.2 Datenbankverhalten

Für die Verifizierung des Datenbankverhaltens und die Diskussion möglicher auftretender Probleme sind zwei Szenarien bestehend aus einer Vielzahl an gefahrenen Strecken generiert worden. Das Szenario 1 beinhaltet 30 und Szenario 2 23 Fahrten. Für beide Szenarien liegt jeweils eine Datenbank mit einer Größe von $k = 5$

und $l = 10$ vor. Die Datenbankgröße wurde bewusst kleiner gewählt, um den Umwälzungsprozess besser erkennen und beurteilen zu können. Jedes Szenario beginnt hierbei mit einer leeren Datenbank.

Die beiden Szenarien beinhalten die in Tabelle 3.3 zu fahrenden Strecken, die nach der in Tabelle 3.4 dargestellten Abfolge durchfahren werden. Zu jeder gefahrenen Strecke ist zusätzlich die erreichte Prognosegüte mit eingetragen. Die in Szenario 2 eingetragenen Kurierfahrten beinhalten unterschiedliche Rundkurse, auf denen der Motor nicht abgestellt wird.

Szenario 1		Szenario 2	
Streckenbeschreibung	Abkürzung	Streckenbeschreibung	Abkürzung
Zuhause→Arbeit	A1_H	Zuhause→Arbeit	A_H
Arbeit→Zuhause	A1_R	Arbeit→Zuhause	A_R
Alternativroute Zuhause→Arbeit	A2_H	Kurierfahrt 1	K_1
Alternativroute Arbeit→Zuhause	A2_R	Kurierfahrt 2	K_2
Zuhause→Freizeitaktivität	F_H	Kurierfahrt 3	K_3
Freizeitaktivität→Zuhause	F_R	Kurierfahrt 4	K_4
Zuhause→Einkaufen	E_H	Kurierfahrt 5	K_5
Einkaufen→Zuhause	E_R	Kurierfahrt 6	K_6

Tabelle 3.3: Streckenbeschreibung der Szenarien 1 und 2

Die in Tabelle 3.5 für Szenario 1 dargestellte Datenbank zeigt, wie innerhalb der ersten 20 Einträge in die Historiendatenbank die erstmalig gefahrenen Strecken jeweils in einer neuen Zeile abgelegt wurden. Neben der Streckenabkürzung sind hier zur Verdeutlichung in den runden Klammern die dazugehörigen Fahrnummern eingetragen. Ein wiederholtes Fahren der Strecke bei gleichzeitiger sicheren Erkennung der Strecke durch den Algorithmus führt zu einem weiteren Eintrag in der dazugehörigen Zeile. Eine nicht erkannte Strecke wie z. B. die Fahrt 10 führt zur Interpretation einer neuen Strecke und somit zu einem Eintrag in einer neuen Zeile in der Datenbank. Obwohl die Fahrt 18 eine Prognosegüte von über 0,9 hat, wird diese aufgrund eines am Ende der Fahrt abweichenden Lenkradwinkelpfils ebenfalls in eine neue Zeile gespeichert, und nicht in die Zeile in der schon F_R(6) und F_R(12) gespeichert sind.

Fahrtnummer	Szenario 1		Szenario 2	
	Strecke	Prognosegüte	Strecke	Prognosegüte
1	A1_H	0,0	A_H	0,0
2	A1_R	0,0	A_R	0,0
3	A1_H	0,88	A_H	0,75
4	A1_R	0,93	A_R	0,86
5	F_H	0,10	A_H	0,77
6	F_R	0,0	K_1	0,0
7	A2_H	0,42	K_2	0,03
8	A2_R	0,0	A_R	0,85
9	A2_H	0,93	A_H	0,63
10	A2_R	0,0	K_1	0,87
11	F_H	0,92	K_3	0,0
12	F_R	0,89	A_R	0,85
13	A1_H	0,87	A_H	0,0
14	A1_R	0,90	K_4	0,29
15	A1_H	0,89	A_R	0,88
16	A1_R	0,87	A_H	0,82
17	F_H	0,94	K_5	0,0
18	F_R	0,93	K_4	0,09
19	A2_H	0,97	K_6	0,0
20	A2_R	0,90	A_R	0,87
21	A1_H	0,88	A_H	0,90
22	A1_R	0,95	K_6	0,28
23	E_H	0,51	A_R	0,89
24	E_R	0,0	—	—
25	A1_H	0,86	—	—
26	A2_R	0,90	—	—
27	F_H	0,97	—	—
28	F_R	0,90	—	—
29	A1_H	0,89	—	—
30	A2_H	0,91	—	—

Tabelle 3.4: Abfolge der Szenarien 1 und 2

Die in Tabelle 3.6 für Szenario 1 dargestellte Datenbank nach 30 Fahrten zeigt, dass die ersten Einträge der am häufigsten gefahrenen Strecke A1_H bereits durch aktuelle Einträge ersetzt worden sind. Außerdem ist während des Szenarios keine weitere Strecke ähnlich wie A2_R(8) detektiert worden, wodurch diese in der Datenbank durch die Strecke E_R(24) ersetzt wurde. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die häufig gefahrenen Strecken gut in der Historiendatenbank repräsentiert sind und diese durch einmalig gefahrene oder falsch assoziierte Strecken nicht überschrieben werden.

Im Szenario 2 wird nach 16 Fahrten, wie in Tabelle 3.7 gezeigt, in der Datenbank deutlich, dass durch einmalige Kurierfahrten und Fehler bei der Streckenerkennung explizit bei A_H alle Zeilen belegt sind. Hieraus resultiert im weiteren Verlauf des Szenarios ein Überschreiben mehrerer Einträge. Tabelle 3.8 zeigt, dass unter anderem die Strecke A_H(1) mit drei assoziierten Fahrten aufgrund des Alters des letzten Eintrages in dieser Zeile durch eine aktuelle Kurierfahrt ersetzt wird. Verlässliche Informationen für eine Geschwindigkeitsprognose gehen somit verloren.

Fazit

Die beiden Szenarien zeigen einerseits die Funktionalität der Umwälzung und der Repräsentation häufig gefahrener Strecken und andererseits die Wichtigkeit einer ausreichend dimensionierten Datenbank mit entsprechenden Ersetzungsstrategien zur Vermeidung des Verlustes relevanter Informationen für die Prognose.

3.2.7 Rechen- und Speicheraufwand

Der Rechenaufwand der Fahrstreckenerkennung und Prognose wird durch das Eintreffen der Sensorsignale wie Lenkradwinkel und Geschwindigkeit auf dem CAN-Bus bestimmt. In dem hier genutzten Messfahrzeug liegt die Periodendauer der genutzten CAN-Botschaften bei 100 ms. Der Algorithmus führt in jedem Iterationsschritt die Merkmalextrahierung des Lenkradwinkels und die Quantisierung der Geschwindigkeit durch. Folglich muss die Ausführungszeit der Vektorisierungen viel kleiner als die Periodendauer von 100 ms sein, damit die Ausführung des Erkennungsalgorithmus und die Berechnung der Geschwindigkeitsprognose noch möglich ist. Dies ist bei den heute im Fahrzeug eingesetzten Mikrocontrollern gegeben.

Da basierend auf dem in dieser Arbeit vorliegenden Datensatz im Durchschnitt 54 Einträge im Lenkwinkelvektor und 352 Einträge im Geschwindigkeitsvektor pro Strecke notwendig sind, liegt der mittlere Speicherbedarf für eine Strecke und ein dazugehöriges Geschwindigkeitsprofil bei 1624 byte unter der Voraussetzung, dass die Einträge als Fließkommawerte auf einer 32 bit Rechnerarchitektur gespeichert

Fahrten pro Strecke [k]					
Strecken [I]	A1_H(1)	A1_H(3)	A1_H(13)	A1_H(15)	leer
	A1_R(2)	A1_R(4)	A1_R(14)	A1_R(16)	leer
	F_H(5)	F_H(11)	F_H(17)	leer	leer
	F_R(6)	F_R(12)	leer	leer	leer
	A2_H(7)	A2_H(9)	A2_H(19)	leer	leer
	A2_R(8)	leer	leer	leer	leer
	A2_R(10)	A2_R(20)	leer	leer	leer
	F_R(18)	leer	leer	leer	leer
	leer	leer	leer	leer	leer
	leer	leer	leer	leer	leer

Tabelle 3.5: Einträge in der Historiendatenbank nach 20 Fahrten beim Szenario 1

Fahrten pro Strecke [k]					
Strecken [I]	A1_H(26)	A1_H(29)	A1_H(13)	A1_H(15)	A1_H(21)
	A1_R(2)	A1_R(4)	A1_R(14)	A1_R(16)	leer
	F_H(5)	F_H(11)	F_H(17)	F_H(27)	leer
	F_R(6)	F_R(12)	F_R(28)	leer	leer
	A2_H(7)	A2_H(9)	A2_H(19)	leer	leer
	E_R(24)	leer	leer	leer	leer
	A2_R(10)	A2_R(20)	A2_R(26)	A2_R(30)	leer
	F_R(18)	leer	leer	leer	leer
	A1_R(22)	leer	leer	leer	leer
	E_H(23)	leer	leer	leer	leer

Tabelle 3.6: Einträge in der Historiendatenbank nach 30 Fahrten beim Szenario 1

Fahrten pro Strecke [k]					
Strecken [l]	A_H(1)	A_H(3)	A_H(9)	leer	leer
	A_R(2)	A_R(4)	A_R(8)	A_R(15)	leer
	A_H(5)	leer	leer	leer	leer
	K_1(6)	K_1(10)	leer	leer	leer
	K_2(7)	leer	leer	leer	leer
	K_3(11)	leer	leer	leer	leer
	A_R(12)	leer	leer	leer	leer
	A_H(13)	leer	leer	leer	leer
	K_4(14)	leer	leer	leer	leer
	A_H(16)	leer	leer	leer	leer

Tabelle 3.7: Einträge in der Historiendatenbank nach 16 Fahrten beim Szenario 2

Fahrten pro Strecke [k]					
Strecken [l]	K_6(22)	leer	leer	leer	leer
	A_R(23)	A_R(4)	A_R(8)	A_R(15)	A_R (20)
	K_5(17)	leer	leer	leer	leer
	K_1(6)	K_1(10)	leer	leer	leer
	K_6(19)	leer	leer	leer	leer
	K_3(11)	leer	leer	leer	leer
	A_R(12)	leer	leer	leer	leer
	A_H(13)	A_H(21)	leer	leer	leer
	K_4(14)	K_4(18)	leer	leer	leer
	A_H(16)	leer	leer	leer	leer

Tabelle 3.8: Einträge in der Historiendatenbank nach 23 Fahrten beim Szenario 2

werden. Der Gesamtspeicherbedarf beträgt somit für die Fahrstreckenerkennung einschließlich der Prognoseberechnung und einer zugrunde gelegten Historiendatenbank mit 10 Strecken und jeweils 5 dazugehörigen Fahrten ca. 100 kbyte.

3.2.8 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fahrstreckenerkennung ein geeignetes Konzept für die Prognose des Geschwindigkeitsprofils basierend auf einer Historiendatenbank darstellt. Dabei haben die Methoden der Merkmalextrahierung und Mustererkennung gegenüber der Korrelations- und Frequenzanalyse deutliche Vorteile sowohl in der Erkennungsquote als auch in der Rechenzeit offenbart. Aus dem aus Messfahrten gewonnenen Datensatz hat sich hierzu im Durchschnitt eine Erkennungsquote von über 80 % bei mehrmaligem Befahren derselben Strecken ergeben.

Mögliche Fehlinformationen durch eine falsche Vektorisierung während eines Fahrzyklus konnten in begrenztem Umfang vom Algorithmus abgefangen werden. Die Funktionsweise des Algorithmus wurde dadurch aber nicht beeinflusst, weil die Strecke als bisher noch nicht gefahren interpretiert und somit als neue Strecke in die Historiendatenbank abgelegt wurde. Ein Problem stellt bedingt durch die Nutzung nur eines Sensorsignals das Auftreten von verschiedenen Strecken mit gleichen Lenkprofilen dar. Unterschiedliche Strecken mit gleichem Lenkprofil können beispielsweise in Städten wie New York oder Mannheim auftreten, wo das Straßennetz nach einem Schachbrettmuster aufgebaut ist. Derartige Mehrdeutigkeiten lassen sich nur unter Berücksichtigung zusätzlicher Unterscheidungsmerkmale durch weitere Sensordaten vermeiden.

Die Rechenzeiten der Algorithmen für die Fahrstreckenerkennung und die Berechnung der Geschwindigkeitsprognose zeigten keine Einschränkungen für eine Umsetzung auf die aktuell im Fahrzeug verbauten Steuergeräte auf. Über die auf einem Steuergerät bereitzustellende Speichergröße für die Historiendatenbank kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Die Größe der Historiendatenbank richtet sich dabei einerseits nach der Anzahl der verschiedenen gefahrenen Strecken und andererseits nach der Häufigkeit der Fahrten pro Strecke. Um einen optimalen Kompromiss zwischen Speichergröße und der ständigen Sicherung von Sensordaten für häufig gefahrene Strecken bei gleichzeitig ausreichender Regenerierung der Datenbank zu erzielen, sind weiterführende Feldversuche seitens der Automobilhersteller notwendig.

Als Schlußfolgerung kann festgehalten werden, dass das Konzept einer Fahrstreckenerkennung basierend auf serienmäßig in allen Fahrzeugklassen verfügbaren Sensordaten eine kurzfristige Umsetzung als zusätzliches Softwaremodul für eine bereits auf einem Steuergerät implementierten Betriebsstrategie erlaubt. Um ausgehend von

einer Fahrstreckenerkennung den Nutzen einer Geschwindigkeitsprognose für eine Betriebsstrategie bzw. für die Energieverteilung im Fahrzeug bewerten zu können, sind Simulationen mit adäquaten Modellen für das Fahrzeug und die Betriebsstrategie durchzuführen.

3.3 Bewertung des Prognosenutzens mittels Fahrstreckenerkennung

Für die Bewertung des Prognosenutzens wurde mit Hilfe des Softwaretools Matlab/Simulink ein parametrierbares Fahrzeugmodell realisiert. Damit lässt sich der Leistungsfluss zwischen den einzelnen Komponenten untersuchen und der gesamte Energieverbrauch über den Fahrzyklus bewerten. Weiterhin ist für die Steuerung des Leistungsflusses eine einfache Betriebsstrategie entwickelt worden. Diese ist soweit skalierbar, dass die verfügbaren Prognoseinformationen genutzt werden können.

3.3.1 Abstraktes Fahrzeugmodell

Das Fahrzeugmodell simuliert eine serielle Antriebsstruktur mit einer Brennstoffzelle, welches aus den in Abbildung 3.13 dargestellten Teilmodellen besteht. In Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsprofil wird die Leistung am Rad über die Fahrwiderstände pro Simulationsschritt bestimmt und diese unter Berücksichtigung der physikalischen Wirkungsgradkette aus Getriebe und Elektromotor im Antriebsstrang und der Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher der Energieverteilung übergeben, die anschließend in Abhängigkeit der Betriebsstrategie auf die Brennstoffzelle und Traktionsbatterie aufgeteilt wird.

Über die Fahrwiderstände wird das notwendige Drehmoment an den Antriebsrädern und somit die erforderliche Radleistung bestimmt. Die in Abbildung 3.14 dargestellten Fahrwiderstände sind der Luft-, Rad-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand.

Die äußere Luftumströmung und die innere Durchströmung des Fahrzeugs führen zu Strömungsverlusten, die den in der Fahrzeuglängsachse entgegengesetzt der Fahrtrichtung wirkenden Luftwiderstand F_L ergeben. Der Luftwiderstand resultiert aus den aerodynamischen Kennwerten (ρ : Luftdichte in kg/m^3 , c_w : Tangentialkraftbeiwert, A : Stirnfläche in m^2) und den Anströmbedingungen (v_F : Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s) nach folgender Formel, bei der die Windgeschwindigkeit vernachlässigt ist [39]:

$$F_L = \frac{\rho}{2} \cdot v_F^2 \cdot c_w \cdot A \quad (3.8)$$

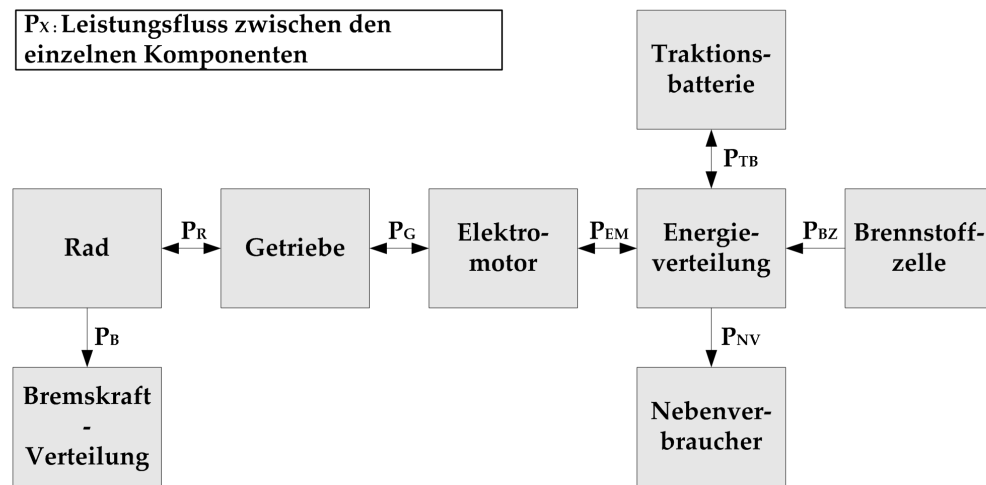


Abbildung 3.13: Bestandteile des abstrakten Fahrzeugmodells

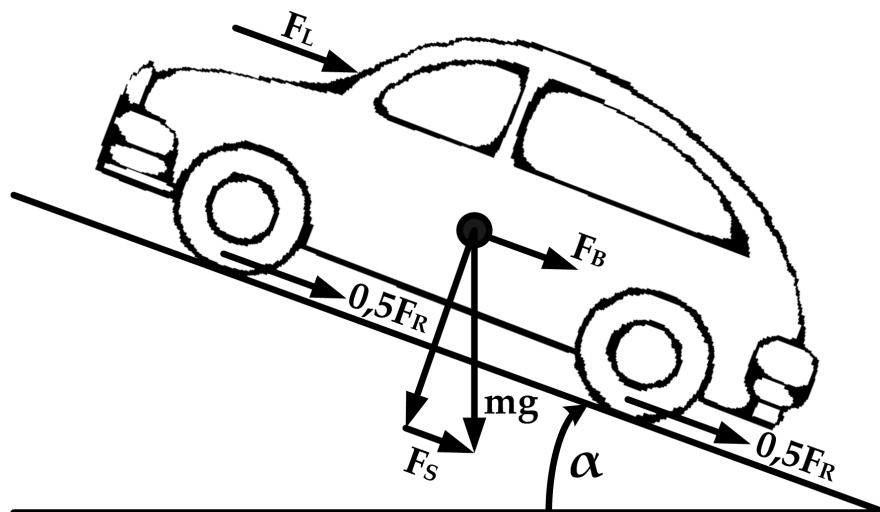


Abbildung 3.14: Fahrwiderstände an einem Fahrzeug

Der Radwiderstand eines einzelnen Rades auf trockener Straße bei Geradeausfahrt entspricht praktisch dem Rollwiderstand F_R . [62] Der Rollwiderstand hängt dabei von der Belastung, der Reifengröße, der Bauart, dem Reifendruck und den achsgeometrischen Kennwerten Sturz und Vorspur ab. Unter der Voraussetzung [39], dass sich für ein vorgegebenes Verhältnis von Belastung und Reifendruck annähernd gleiche Rollwiderstandsbeiwerte ergeben, kann der Rollwiderstand wie folgt berechnet werden (f_R : Rollwiderstandsbeiwert, m : Fahrzeugmasse in kg, g : Erdbeschleunigung in m/s^2 , α : Steigungswinkel):

$$F_R = f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (3.9)$$

Beim Befahren einer Steigung wirkt die Gewichtskraft des Fahrzeugs nicht mehr senkrecht auf die Fahrbahn, sondern, wie in Abbildung 3.14 dargestellt, zum Teil der Fahrzeuginnenachse entgegen. Der Steigungswiderstand ergibt sich somit zu:

$$F_S = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3.10)$$

Der Steigungswiderstand wird bei Verbrauchsmessungen sowohl im stationären Betrieb als auch im Fahrzyklus nicht berücksichtigt. Dies ist laut [39] darauf zurückzuführen, dass repräsentative Höhenprofile bisher in Verbindung mit den dazu passenden Fahrzyklen nicht vorliegen und somit keine allgemeingültigen Aussagen möglich sind.

Zusätzlich zu den Fahrwiderständen für konstante Geschwindigkeiten kommt durch Beschleunigung oder Verzögerung des Fahrzeugs die Trägheitskraft hinzu. Der dabei auftretende Widerstand setzt sich aus einem rotatorischen und einem translatorischen Anteil zusammen. Für den rotatorischen Teil wird vereinfachend ein Massefaktor eingeführt. Der Massefaktor erfasst die scheinbare Vergrößerung der Fahrzeugmasse durch die Drehmassen (Räder, Kurbelwelle, usw.). Hieraus resultiert der zu überwindende Beschleunigungswiderstand zu (λ : Massefaktor, a : Fahrzeugbeschleunigung in m/s^2):

$$F_B = \lambda \cdot m \cdot a \quad (3.11)$$

Die erforderliche Zugkraft an den Rädern entspricht der Summe der oben vorgestellten Widerstände. Hieraus berechnet sich die Radleistung unter Vernachlässigung des Antriebsschlupfes [62] wie folgt:

$$P_R = (F_R + F_L + F_S + F_B) \cdot v_F \quad (3.12)$$

$$= \left(f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot v_F^2 \cdot c_W \cdot A + m \cdot g \cdot \sin \alpha + \lambda \cdot m \cdot a \right) \cdot v_F \quad (3.13)$$

3.3.2 Bremskraftverteilung, Getriebe und Elektromotor

Die am Rad aufzubringende mechanische Leistung wird in diesem Fahrzeugmodell vom Elektromotor bereitgestellt, die zur Drehzahlanpassung zwischen Achse

und Elektromotor über ein Getriebe mit einem festen Übersetzungsverhältnis geführt wird. Da in dem Fahrzeugmodell nur das energetische Verhalten abgebildet werden soll, wird nur der Wirkungsgrad des Getriebes und des Elektromotors im Fahrzeugmodell berücksichtigt. Die Verluste sind dabei unter anderem abhängig von dem Drehmoment und der Drehzahl. Zur Vereinfachung des Modellierungsaufwandes wurden in dem Fahrzeugmodell statische Wirkungsgrade angenommen.

Die statischen Wirkungsgrade betragen in diesem Modell 0,97 für das Getriebe und 0,85 für den Elektromotor. Neben den Wirkungsgraden wurden die Grenzwerte des Elektromotors hinsichtlich maximaler Motor- und Generatorleistung mit 100 kW bzw. -100 kW berücksichtigt. Weiterhin ist die Bremskraftverteilung einbezogen worden, die im realen Fahrzeug zur Sicherstellung der Fahrzeugstabilität eine Aufteilung der Bremsleistung auf die Vorder- und Hinterachse vornimmt. Hierdurch wird bei der Bewertung des energetischen Verhaltens über den Fahrzyklus gewährleistet, dass nicht die ganze am Rad zur Verfügung stehende Rekuperationsleistung über den Elektromotor zurück gewonnen wird. In diesem Modell wird daher 33 % der gesamten Bremsleistung der Hinterachse zugeteilt.

3.3.2.1 Brennstoffzelle und Traktionsbatterie

Die Hauptaufgabe der Traktionsbatterie in Fahrzeugen mit einer Brennstoffzelle ist, bei Beschleunigungsvorgängen zusätzliche Energie bereitzustellen und verfügbare Rekuperationsenergie zu speichern. Der notwendige Eingriff bei Beschleunigungsvorgängen resultiert aus der verzögerten Leistungsbereitstellung der Brennstoffzelle bei Lastwechseln. Dies führt zu einem in Abhängigkeit vom Fahrzyklus erhöhten Lade- und Entladeverhalten, das bei der energetischen Gesamtbewertung des Fahrzeuges mit berücksichtigt werden muss. Folglich wurde das Verhalten der Brennstoffzelle bei Lastwechseln im Fahrzeugmodell mit einem PT1-Element nachgebildet. Außerdem ist in dem Modell für die Brennstoffzelle ein von der elektrischen Ausgangsleistung abhängiges Wirkungsgradkennfeld hinterlegt, woraus die erforderliche chemische Leistung ermittelt wird.

Das Modell der Traktionsbatterie beinhaltet eine einfache Ladebilanzierung zur Bestimmung des State of Charge (SOC) unter Berücksichtigung eines statischen Wirkungsgrades für das Laden und Entladen. Dabei wird die während des Fahrzyklus aufgenommene und entnommene Ladungsmenge über

$$Q = \int_{t=0}^{t_e} I(t) \cdot dt \quad (3.14)$$

und der SOC mit

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{Q_{nom}}\right) \cdot 100\% \quad (3.15)$$

berechnet. Die Einflüsse auf die entnehmbare Kapazität wie zum Beispiel die Temperatur, das Lastprofil oder die Alterungsprozesse sind in dem Modell nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Leistungsbereiche für die Brennstoffzelle zwischen 0 kW und +67,8 kW und für die Traktionsbatterie zwischen -40 kW und +40 kW definiert.

3.3.2.2 Nebenverbraucher

Die elektrischen Nebenverbraucher wie der Klimakompressor, Zuheizsysteme wie z. B. ein PTC-Zuheizter und das 14 V Bordnetz wurden in dem Fahrzeugmodell zu einer Last zusammengefasst, die über den Zyklus mit konstanter Leistung angenommen wurde. Da die Leistungsaufnahme dieser Komponenten von der Außentemperatur abhängig ist, wurde bei den Simulationen zwischen einem Sommer- und Winterbetrieb unterschieden. Hierbei ist eine Leistungsaufnahme für den Sommerbetrieb von 3 kW und für den Winterbetrieb von 4 kW definiert worden.

3.3.2.3 Energieverteilung

Die Energieverteilung übernimmt im Fahrzeugmodell die Funktion eines Power-DC/DC-Wandlers. Es wird hierbei nicht das physikalische Verhalten eines DC/DC-Wandlers nachgebildet, sondern nur die Leistungsflussrichtung zwischen Brennstoffzelle, Traktionsbatterie, Nebenverbraucher und Antrieb während des Fahrzyklus in Abhängigkeit von der Betriebsstrategie dynamisch festgelegt und die Einhaltung der aus dem 1. Kirchhoffschen Gesetz resultierenden Stromgleichung geprüft.

3.3.3 Betriebsstrategie

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Betriebsstrategie entwickelt, die das Laden und Entladen der Traktionsbatterie umfasst. Diese hat aber nicht den Anspruch, eine optimale Strategie für den Fahrzeugeinsatz zu sein, sondern sie dient lediglich dazu, den möglichen Einfluss von Prognoseinformationen auf das Betriebsverhalten aufzuzeigen und zu bewerten.

Der Grund für die Betrachtung der Lade- und Entladestrategie ist, dass die Lebensdauer des Batteriesystems für die Wirtschaftlichkeit beim Fahrzeugeinsatz von entscheidender Bedeutung ist. Das Ende der Batterielebensdauer ist dabei erreicht, wenn die Kapazität auf 80 % des Anfangswertes abgefallen ist. Der bis dahin mögliche Kapazitätsdurchsatz ist abhängig von den Lade- und Entladebedingungen. Es zeigt sich, dass mit der Einhaltung kleiner Ladezustandsfenster sehr hohe Zyklenlebensdauern erreicht werden. Der Innenwiderstand und die Leistungsdaten bleiben

bei einem solchen Zyklusbetrieb fast unverändert, woraus ein konstanter Energiewirkungsgrad über die gesamte Lebensdauer der Batterie resultiert. [44] Folglich muss ein Ziel der Betriebsstrategie in einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb sein, die Mindestlebensdauer der Batterie zu gewährleisten, indem der Ladezustand der Traktionsbatterie über den Fahrzyklus überwacht und geregelt wird.

3.3.3.1 Strategie ohne Prognose

Die Betriebsstrategie ohne Prognose des Geschwindigkeitsprofils für den weiteren Fahrzyklus ist so ausgelegt, dass ein Sollwert für den SOC-Wert über den Fahrzyklus eingehalten wird, um zukünftige Tiefentladungen weitestgehend zu vermeiden. Die Batterie wird dabei während der Phasen konstanter Geschwindigkeit und der Verzögerungsphasen je nach Abweichung vom Sollwert geladen. Für den Sollwert wurde hier ein SOC von 0,89 angenommen. Als obere Ladungsgrenze der Batterie wurde ein SOC von 0.9 festgelegt.

Abbildung 3.15 zeigt bei einem Anfangswert des SOC von 0,8 das Laden der Batterie auf den Sollwert während des ersten Drittels der Fahrstrecke. Die im weiteren Fahrzyklus auftretenden Abweichungen resultieren aus Beschleunigungsphasen, in denen die Traktionsbatterie die begrenzte Dynamik der Brennstoffzelle ausgleicht. Bei Abweichungen vom Sollwert lädt die Brennstoffzelle dabei über eine Lastpunktanhebung die Batterie sofort wieder nach. Der mit dem sofortigen Aufladen auf den SOC von 0,89 verbundene Nachteil ist, dass weniger der am Rad zur Verfügung stehenden Rekuperationsenergie in weiteren Verzögerungsphasen des Fahrzyklus genutzt werden kann.

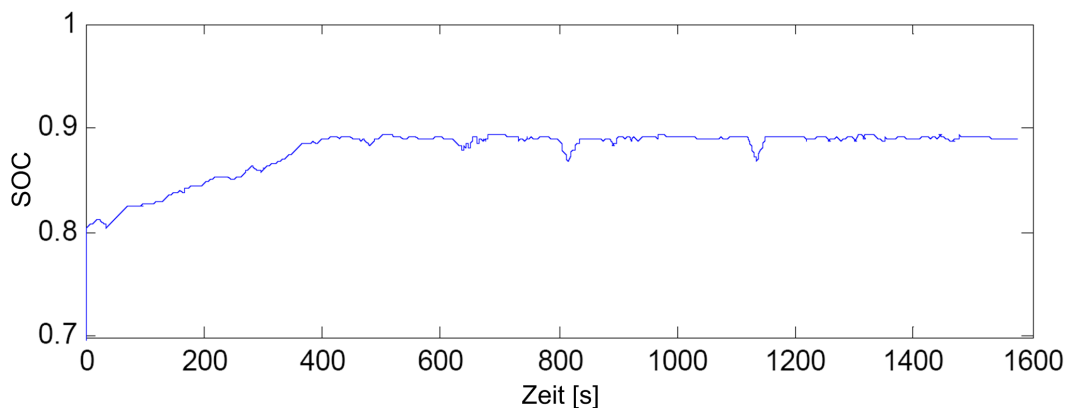


Abbildung 3.15: SOC-Verlauf ohne Nutzung der Prognoseinformationen

3.3.3.2 Strategie mit Prognose

Um den Nachteil einer geringeren Ausnutzung von Rekuperationsenergie aufgrund einer voll geladenen Batterie zu beheben, soll die in Abschnitt 3.2.5 aus der Fahrstreckenerkennung gewonnene Geschwindigkeitsprognose in die Betriebsstrategie eingebunden werden. Dadurch ist es möglich, vor dem Eintreffen von Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen vorsteuernde Maßnahmen für die Energieverteilung einzuleiten.

Die Betriebsstrategie wurde im Gegensatz zu Abschnitt 3.3.3.1 so erweitert, dass im Fall von verfügbaren Prognoseinformationen nicht mehr ein Sollwert für den SOC, sondern nur noch ein definiertes SOC-Fenster eingehalten werden muss. Das Minimum und Maximum des SOC-Fensters sind in dieser Betriebsstrategie auf 0,8 bzw. 0,9 festgelegt worden. Solange keine Prognoseinformationen beispielsweise durch ein Nichterkennen einer Fahrstrecke vorliegen, arbeitet die Betriebsstrategie weiterhin wie in Abschnitt 3.3.3.1 erläutert.

Der grundlegende Systemaufbau der Betriebsstrategie mit Prognose ist in Abbildung 3.16 verdeutlicht. Das Prognosesystem übermittelt der Betriebsstrategie nach Erkennung der Strecke einen Vektor mit den zukünftig auftretenden Geschwindigkeitsgradienten. Jeder Vektoreintrag besteht, wie in Abschnitt 3.2.5.2 dargestellt, aus der prognostizierten Zeit bis zum Auftreten des Gradienten, der Anfangs- und Endgeschwindigkeit und der Dauer des Gradienten.

In der Betriebsstrategie erfolgt dann im ersten Schritt die Auswertung dieser Vektoreinträge. Aus diesen Informationen wird die aufzubringende bzw. rückgewinnbare Energie am Rad mit den in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Fahrwiderständen ermittelt. Der Prognosehorizont für die Auswertung ist auf die jeweils ersten zwei vorhergesagten Gradienten beschränkt. Dabei wird eine ständige Aktualisierung der Zeit t_{grad} bis zum Auftreten des Gradienten basierend auf der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit durchgeführt, um die Güte der Vorhersage zu verbessern. Hieraus ergibt sich bezogen auf den hier vorliegenden Datensatz im Mittel ein Prognosezeitraum von ca. 80 s. Basierend auf dem Prognosezeitraum, der vorhergesagten Gradienten und der Berücksichtigung des aktuellen SOC-Wertes wird eine Datenbewertung durchgeführt, die der nachfolgenden kombinatorischen Logik übergeben wird.

Kombinatorische Logik

Eine kombinatorische Logik besteht allgemein aus n Eingängen mit $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ und m Ausgängen mit $m \geq 1$, welche die Funktionen $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X))$ realisieren. Dabei wird $F(X)$ zu jedem Zeitpunkt ausschließlich durch X bestimmt und jede Änderung an den Eingängen wirkt sich sofort auf die Ausgänge aus. In der hier zugrunde gelegten Betriebsstrategie werden die folgenden vier Eingangsparameter aus der Datenbewertung bereitgestellt:

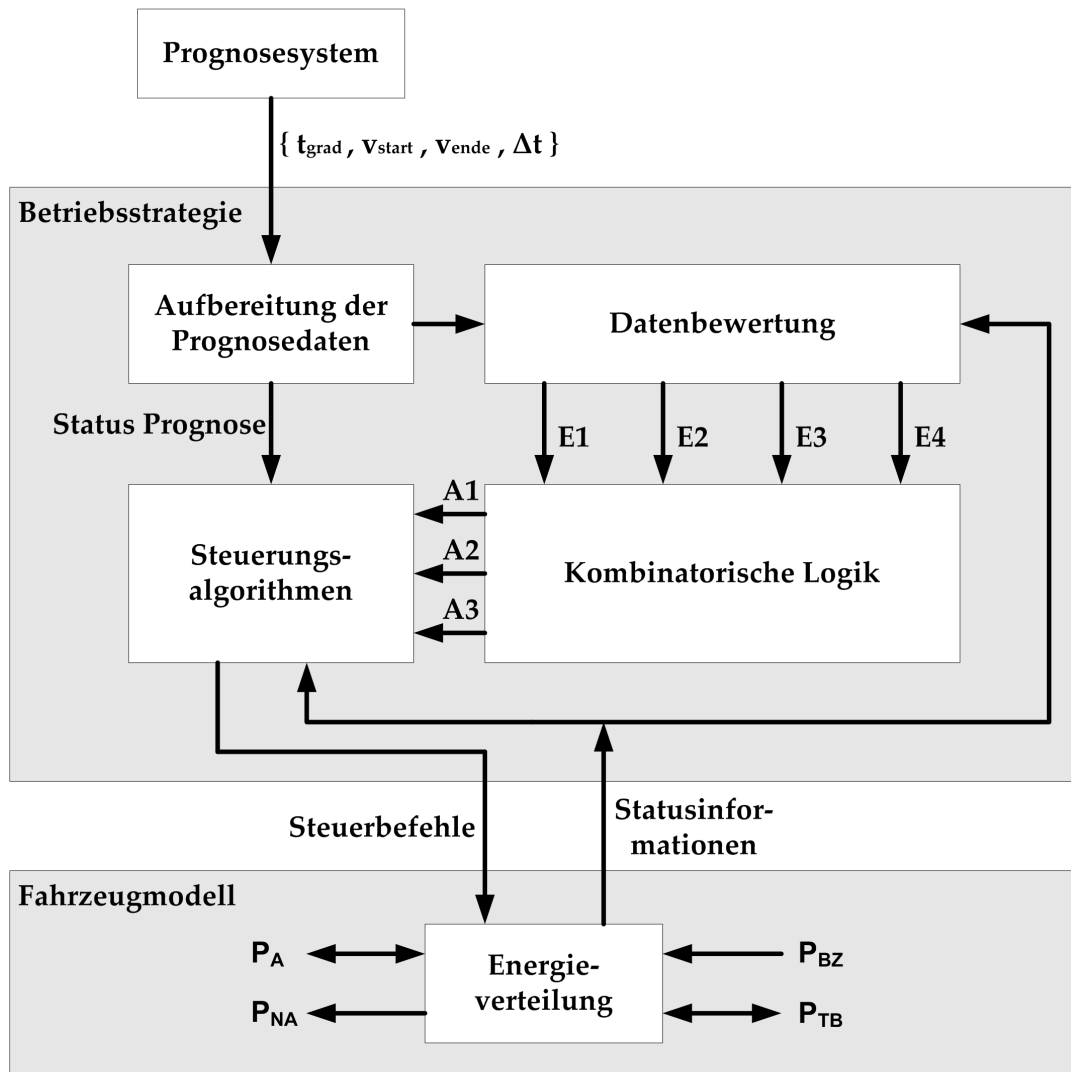


Abbildung 3.16: Detailliertes Systemkonzept der Betriebsstrategie mit Nutzung der Prognoseinformationen

- $E1$: Aktueller SOC kritisch ($E1 = 0$) oder SOC nicht kritisch ($E1 = 1$)
- $E2$: 1. Gradient negativ ($E2 = 0$) oder positiv ($E2 = 1$)
- $E3$: 2. Gradient negativ ($E3 = 0$) oder positiv ($E3 = 1$)
- $E4$: Energie $W1$ des 1. Gradienten kleiner als die Energie $W2$ des 2. Gradienten ($E4 = 0$) oder $W1$ größer gleich $W2$ ($E4 = 1$)

Die Grenze für einen nicht kritischen SOC wurde bei größer gleich 81 % festgelegt. Die Logik setzt hierbei in Abhängigkeit der Zustände dieser Eingangsparameter drei Ausgänge, wobei jedem Ausgang jeweils eine der folgenden Maßnahmen für die Steuerungsalgorithmen bzw. Energieverteilung zugeordnet wurde:

- $A1$: Entladen/Nicht Entladen ($A1 = 1 / A1 = 0$) der Batterie in Konstantfahrphasen zur Versorgung der Nebenaggregate und des Bordnetzes
- $A2$: Entladen/Nicht Entladen ($A2 = 1 / A2 = 0$) der Batterie in Verzögerungsphasen zur Versorgung der Nebenaggregate und des Bordnetzes
- $A3$: Nicht Laden/Laden ($A3 = 1 / A3 = 0$) der Batterie durch die Brennstoffzelle in Konstantfahrphasen

Tabelle 3.9 zeigt einen Auszug aus der in der Betriebsstrategie hinterlegten Logiktafel, wobei für die 4 Eingangsparameter 16 Regeln für die Energieverteilung aufgestellt worden sind. Die Ausgangszustände der kombinatorischen Logik werden den Steuerungsalgorithmen übergeben, die in Abhängigkeit von den Zeiten t_{grad1} und t_{grad2} und des aktuellen Leistungsbedarfs von Antrieb und Nebenverbraucher die von der kombinatorischen Logik einzuleitenden Maßnahmen in Steuerungsbefehle umsetzt und diese der Energieverteilung übermittelt. Das Konzept der in der kombinatorischen Logik aufgestellten Regeln wird im Folgenden an den in Tabelle 3.9 eingetragenen Werten näher erläutert.

Eingangsparameter				Ausgangsparameter		
E1	E2	E3	E4	A1	A2	A3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	0	0	1	1	1	1
0	1	1	1	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabelle 3.9: Auszug aus der kombinatorischen Logik

Liegt während der Fahrt aktuell ein nicht kritischer SOC vor und sagt die Geschwindigkeitsprognose für die ersten beiden Gradienten eine Verzögerungsphase voraus, so werden alle drei Ausgänge auf eins gesetzt. Daraus folgt, dass die kombinatorische Logik den nachfolgenden Steuerungsalgorithmen ein Entladen der Batterie vor diesen Verzögerungsphasen empfiehlt. Des Weiteren soll die Batterie während der Verzögerungsphase den restlichen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher decken, falls die Rekuperationsleistung kleiner als die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher ist. Außerdem ist für diese vorhergesagten Zustände ein Laden der Batterie durch die Brennstoffzelle nicht erforderlich. Liegt dagegen bei einer Vorhersage von Beschleunigungsphasen aktuell ein kritischer SOC vor, so werden alle Ausgänge auf null gesetzt, wodurch einerseits ein Entladen der Batterie vermieden wird und andererseits ein Laden der Batterie durch die Brennstoffzelle eingeleitet wird.

3.3.4 Ergebnisse

Zur Bewertung des Prognosenutzens wurden aus dem durch über 100 Messfahrten gewonnenen Datensatz 10 charakteristische Profile herangezogen. Tabelle 3.10 zeigt die verschiedenen prozentualen Geschwindigkeitsanteile dieser ausgewählten Strecken, die Stadt-, Land- und Autobahnfahrten beinhalten. Jede Strecke wurde mit dem im Abschnitt 3.3.1 vorgestellten abstrakten Fahrzeugmodell simuliert. Dabei wurde zum einen die Betriebsstrategie ohne Prognose und zum anderen die Betriebsstrategie mit Prognose verwendet.

Weiterhin sind diese Simulationen mit den in Tabelle 3.11 dargestellten Fahrzeugtypen im Sommerbetrieb durchgeführt worden. Die Fahrzeugtypen sind nach Kleinwagen, Mittel- und Oberklassewagen klassifiziert und bilden unterschiedliche physikalische Parameter ab. Als zu befahrende Streckenoberfläche wurde Asphalt angenommen. Die Masse des Durchschnittsfahrers von 75 kg wurde zusätzlich zur Fahrzeugmasse berücksichtigt. Der für den Beschleunigungswiderstand relevante Massefaktor ist hier aus Vereinfachungsgründen auf eins gesetzt worden.

Der Winterbetrieb wurde exemplarisch für einen Mittelklassewagen simuliert, um eine grundlegende Auswirkung eines umweltbedingten höheren Leistungsbedarfs der Nebenverbraucher auf den Prognosenutzen abzuschätzen. Der Ladezustand der Traktionsbatterie wurde hierbei zu Beginn jeder Simulation auf den Wert 0,8 festgelegt.

3.3.4.1 Bewertung

Es hat sich gezeigt, dass bei der Nutzung der Prognoseinformationen über zukünftige Leistungsanforderungen kein ständiges Nachladen der Traktionsbatterie durch

Strecke	Geschwindigkeit in km/h				
	0<...≤5	5<...≤30	30<...≤60	60<...≤100	100<...≤180
1	25,30 %	37,50 %	37,20 %	0 %	0 %
2	43,40 %	26,80 %	29,80 %	0 %	0 %
3	6,50 %	11,20 %	37,60 %	6,20 %	38,50 %
4	10,80 %	14,00 %	53,30 %	21,87 %	0,03 %
5	10,30 %	12,50 %	34,60 %	42,60 %	0 %
6	11,00 %	16,60 %	40,50 %	21,60 %	10,30 %
7	6,70 %	23,70 %	44,30 %	25,30 %	0 %
8	10,60 %	12,90 %	48,10 %	27,80 %	0,60 %
9	17,60 %	41,20 %	41,20 %	0 %	0 %
10	5,00 %	26,40 %	39,50 %	13,60 %	15,50 %

Tabelle 3.10: Ausgewählte Geschwindigkeitsprofile für die Bewertung des Prognosenutzens

	Kleinwagen	Mittelklassewagen	Oberklassewagen
Fahrzeugmasse	900 kg	1343 kg	2264 kg
c_w -Wert	0,29	0,32	0,35
Stirnfläche	2 m ²	2,2 m ²	2,78 m ²
Dynamischer Reifenradius	0,2745 m	0,3067 m	0,3083 m
Rollwiderstandskoeffizient		0,01	
Massefaktor		1	
Luftdichte		1,2 kg/m ³	

Tabelle 3.11: Physikalische Fahrzeugparameter

die Brennstoffzelle erforderlich ist, um den SOC in einem definierten Ladefenster während des Fahrzyklus zu halten. Hierdurch wird einerseits die Lebensdauer der Batterie positiv beeinflusst und andererseits eine Möglichkeit geschaffen, in Abhängigkeit der Prognoseinformationen durch gezieltes Laden und Entladen der Batterie ein besseres Ausnutzen der theoretisch verfügbaren Rekuperationsenergie und somit eine Reduzierung des gesamten Energieverbrauchs zu erreichen.

Mit der Einbindung der durch die Fahrstreckenerkennung gewonnenen Prognoseinformationen in die Betriebsstrategie ist eine deutliche Verbesserung der genutzten Rekuperationsenergie erkennbar. Die Verbesserung der genutzten Rekuperationsenergie kann hierbei im Vergleich zu der Betriebsstrategie ohne Prognoseinformationen bis zu 94 % in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse und vom Fahrzyklus betragen.

Im Gegensatz zum Sommerbetrieb stellt sich im Winterbetrieb durch die angenommene Änderung von 3kW auf 4kW Leistungsaufnahme der Nebenaggregate und des Bordnetzes eine höhere Ausnutzung der Rekuperationsenergie für alle Fahrzeugtypen ein. Diese erhöht sich bei den hier durchgeführten Simulationen für einen Mittelklassewagen mit Einbindung der Prognose von 10,3 % im Sommerbetrieb auf 11,1 % im Winterbetrieb. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass durch verschiedene Ausstattungsgrade und zukünftige Hochleistungsverbraucher im Bordnetz eine noch höhere Ausnutzung der Rekuperationsenergie möglich sein wird.

3.4 Fazit

In den nächsten Jahren wird die Nutzung von Prognoseinformationen über die Strecke und vorausliegende Verkehrssituationen zur Unterstützung der Betriebsstrategie zunehmend an Bedeutung gewinnen, weil hierdurch ein effizienterer Fahrzeugbetrieb ermöglicht wird. Langfristig gesehen wird dabei die Verwendung sowohl von gespeicherten Streckendaten in Historiendatenbanken und Navigationssystemen als auch von Umfelddaten des Fahrzeugs für ein Prognosesystem die optimale Lösung darstellen. Um einen bestmöglichen Nutzen zu erzielen, ist dafür aber eine durchgängige Verfügbarkeit der erforderlichen Systeme in allen Fahrzeugklassen und eine Umsetzung der Infrastruktur für die Kommunikationssysteme im Nahbereich zum Datenaustausch relevanter Strecken- und Verkehrsinformationen erforderlich.

Neben dem im Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellten Konzept des gezielten Ladens und Entladens der Batterie vor dem Eintreten von Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen sind weitere Maßnahmen denkbar. Beispielsweise kann die Geschwindigkeitsprognose genutzt werden, um eine Lastpunktanhebung, d.h. das Laden der Batterie

mit der Brennstoffzelle, erst in einer vorausliegenden Autobahnfahrtphase durchzuführen, wo sich die Brennstoffzelle in einem wirkungsgradgünstigeren Bereich befindet.

Weiterhin kann die Betriebsstrategie bei Kenntnis des zukünftigen Geschwindigkeits- und Höhenprofils vorab den Batterieladezustand den kommenden Erfordernissen optimal anpassen. Somit kann ein vorheriges Aufladen der Batterie bei Prognose einer vorausliegenden Steigung oder eines Abschnitts mit geringer Geschwindigkeit und einer damit wahrscheinlich reinen elektrischen Fahrt durchaus sinnvoll sein. Hinzu kommt, dass mit Kenntnis des Geschwindigkeits- und Höhenverlaufs eine genauere Reichweitenvorhersage des Fahrzeugs basierend auf der im Tank enthaltenen Energiemenge getroffen werden kann.

Bei Start/Stop-Anwendungen ist in der Prädiktion der Fahrzeugstartfähigkeit ein weiterer gewinnbringender Nutzen für die Betriebsstrategie zu sehen. Hierzu fließen einerseits die Vorhersage des Zeitpunktes und der Dauer der Stopp-Phase und andererseits die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher während dieser Stopp-Phase in die Betriebsstrategie ein, um daraus abzuleiten, ob der SOC zu stark absinken wird und somit entsprechende Ladevorgänge vor der Stopp-Phase eingeleitet werden müssen. Wird dagegen ein nicht zu starker SOC-Abfall vorhergesagt, kann ein vorheriges Laden vermieden werden und dieses erst nach der Stopp-Phase in einem ebenfalls prognostizierten günstigeren Betriebsbereich ausgeführt werden.

Neben der Verwendung der Prognose für die Betriebsstrategie antriebsrelevanter Funktionen in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist es auch denkbar, die Aktivierung von Bordnetzkomponenten bzw. Bordnetzleistungsprofile zur Vorsteuerung des Verbrennungsmotors in Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb mittels Drehmomenterhöhung oder kurzfristiger Verbraucherabschaltung vorherzusagen, um z. B. das Einbrechen der Bordnetzspannung beim Zuschalten von Hochleistungsverbrauchern zu verhindern. Dabei sollten zur besseren Klassifizierung die Bordnetzleistungsprofile mit Zeit- und Datumstempel und gegebenenfalls mit Angaben zu den im Aufzeichnungszeitraum vorherrschenden Witterungsbedingungen versehen werden. Des Weiteren kann beispielsweise auch das bei der Fahrstreckenerkennung benutzte Lenkradwinkelsignal eingesetzt werden, um zukünftige Lenkradbewegungen und die damit einhergehenden Leistungsspitzen im Bordnetz, worauf im Abschnitt 4.3.2.2 noch detaillierter eingegangen wird, zu prognostizieren.

Grundsätzlich ist aus den oben gemachten Ausführungen die Vision einer selbst lernenden Betriebsstrategie ableitbar, die sich den individuellen Fahreigenschaften des Fahrers und den auf seinen gefahrenen Strecken typischen Streckencharakteristika anpasst. Verschiedene Methoden wie beispielsweise das Neuro-Fuzzy-System sind als adaptierbare Systeme bekannt und müssen auf ihre Eignung für den Fahrzeug-einsatz hin geprüft werden. Inwieweit sich dabei die Betriebsstrategie dem Fahrer

oder der Fahrer der Betriebsstrategie anpassen soll, kann hier nicht endgültig beantwortet werden und obliegt letztendlich den Zielvorgaben der Automobilhersteller.

4 Bordnetzanalyse (L)

Die Dimensionierung der Energieversorgung für das Kfz-Bordnetz ist ein wichtiger Bestandteil des ganzheitlichen Energiemanagements innerhalb der Fahrzeugentwicklung. Dabei stellt der Aufbau des Bordnetzes aus Verbrauchern, Speichern, Umsetzern und Quellen in Abhängigkeit von der Antriebsart und des Ausstattungsgrades und deren Betriebsverhalten eine wichtige Basis dar.

Im Folgenden wird eine Bordnetzanalyse durchgeführt, die den Aufbau des elektronischen Fahrzeugsystems näher beleuchtet. Anschließend wird die elektrische Bordnetzleistung analysiert und bewertet. Hierzu wird eine Charakterisierung der im Bordnetz verbauten Komponenten mittels der installierten Leistung in Abhängigkeit von der Antriebsart und dem Ausstattungsgrad gemacht. Des Weiteren werden der Bordnetzverbrauch für verschiedene Betriebsphasen des Bordnetzes ermittelt und daraus die Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten im Bordnetz identifiziert. Abschließend werden aus der Bordnetzanalyse Schlussfolgerungen für den Entwicklungsprozess „Dimensionierung der Bordnetzenergieversorgung“ abgeleitet.

4.1 Aufbau des elektronischen Fahrzeugsystems

Sensoren, Aktoren, Bedienelemente und Kommunikationsnetzwerke bilden, wie in Abbildung 4.1 verdeutlicht, als Peripherie die Schnittstellen zwischen dem Fahrzeug mit seinen Antriebs-, Sicherheits- und Komfortfunktionen und dem Steuergerät als Verarbeitungseinheit. Innerhalb dieses Kapitels wird genauer auf diese Bestandteile des elektronischen Fahrzeugsystems eingegangen, um die Umsetzung der Bordnetzfunktionen und den damit bis heute erreichten Komplexitätsgrad aufzuzeigen.

4.1.1 Spannungsversorgung

Der Betrieb der Kraftfahrzeugelektronik erfordert eine sehr genaue, geglättete und stabile Versorgungsspannung von meist +5 V oder +3 V. Dies muss einerseits für einen großen Temperaturbereich von -40 °C bis +125 °C und andererseits unter Einfluss von starken elektromagnetischen Störfeldern gewährleistet sein. Abbildung 4.2

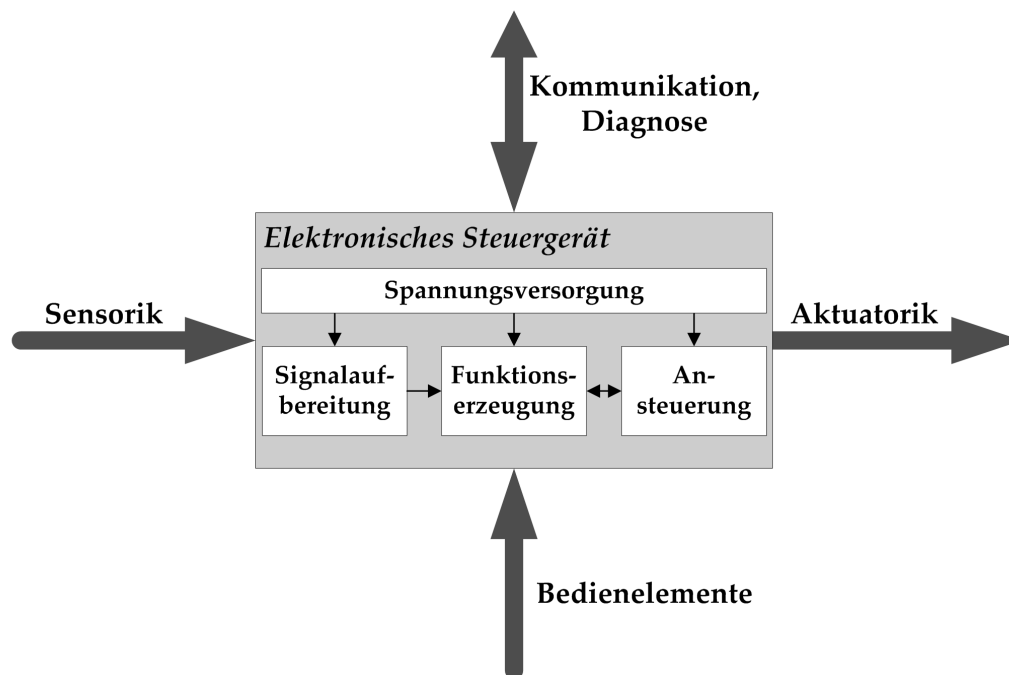


Abbildung 4.1: Grundelemente eines elektronischen Fahrzeugsystems

zeigt hierzu ein Schaltungsbeispiel für eine kraftfahrzeugtaugliche Spannungsversorgung. Für die Spannungsregelung werden sogenannte Low-Drop-Regler verwendet, weil diese im Gegensatz zu Standard-Spannungsreglern teilweise bis zu einer Differenzspannung von 100 mV bis 200 mV zwischen Ein- und Ausgang funktionieren. Das heißt, sie können auch im Startfall des Fahrzeugs, bei dem Spannungseinbrüche bis auf 5 V im Extremfall möglich sind, die notwendige Betriebsspannung für die Kfz-Elektronik bereitstellen. Weiterhin sind im Spannungsregler Komparatoren verbaut, die die Ausgangsspannung ständig überwachen und bei einem Absinken unter einen kritischen Wert ein Reset-Signal auslösen. Dadurch wird sichergestellt, dass der Betrieb des Steuergerätes erst dann zugelassen wird, wenn die benötigte Versorgungsspannung in den vorgegebenen Grenzen stabil ist und für eine bestimmte Zeit auch stabil angelegen hat. Um mögliche Störungen bzw. Frühausfälle durch leitungsgebundene Impulse im Bordnetz zu minimieren, wird der Spannungsregler extern mit Dioden, Kondensatoren und Widerständen beschaltet.

4.1.2 Funktionserzeugung

Es gibt verschiedene Arten, die Funktionserzeugung durchzuführen. Hierzu zählen die fest verdrahtete Logik, der applikationsspezifische Schaltkreis (ASIC), das programmierbare Steuerwerk und der Mikrocontroller. In den letzten Jahren haben sich

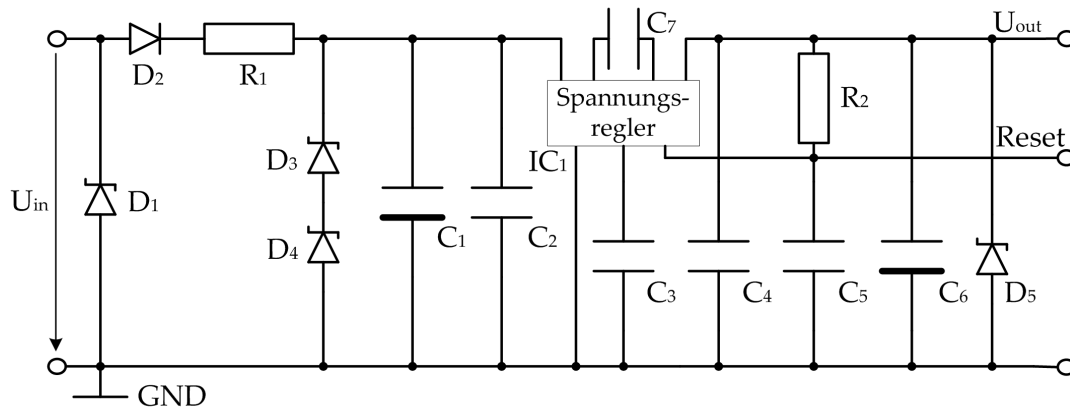


Abbildung 4.2: Spannungsversorgung der Kfz-Elektronik

im Kfz die ASICs und die Mikrocontroller aufgrund des zunehmenden Funktionsumfangs, der plattformunabhängigen Funktionen und des erhöhten Kostendrucks etabliert.

4.1.2.1 ASIC

Ein ASIC ist eine elektronische Schaltung, die als integrierter Schaltkreis entwickelt wird. Ein Großteil der heutzutage produzierten ASIC-Chips sind applikationsspezifisch. Sie unterscheiden sich im Vergleich zu den PLDs (Programmable Logic Device) und FPGAs (Field Programmable Array) darin, dass die Funktionalität vom Hersteller eindeutig vorgegeben werden muss. Daraufhin kann die interne Schaltung vom Anwender nicht mehr verändert werden. Ein bekanntes Beispiel für eine ASIC-Anwendung im Kraftfahrzeug ist der Blinkgeber.

Es existieren auch ASIC-Varianten, auf denen Mikroprozessoren oder Signalprozessoren integriert sind, wodurch eine gewisse Flexibilität durch die darauf ablaufende Software erreicht werden kann. Wegen der Adaption ihrer Architektur auf ein spezifisches Problem arbeiten die Schaltkreise sehr effizient und schneller als eine funktionsgleiche Umsetzung per Software auf einem Mikrocontroller.

4.1.2.2 Mikrocontroller

Die Funktionen im Kraftfahrzeug, die mit einer hohen Steuerungs- und Regelungskomplexität verbunden und aus Wettbewerbsgründen stetigen Änderungen bzw. Erweiterungen unterworfen sind, werden vorwiegend auf Mikrocontrollern implementiert. Die Komplexität der Systeme steigt, wie in Abbildung 4.3 verdeutlicht, in Bezug auf die Zunahme des Programmcodes und den damit verbundenen Umfang der

Funktionen. Da die Funktionen für den Wettbewerb der Automobilhersteller essentiell sind, werden 90 % der zukünftigen Innovationen im Kraftfahrzeug von der Elektronik geprägt sein, wobei ein großer Anteil dieser Innovationen über die Software abgebildet wird. [23]

Ein Mikrocontroller besteht dabei, wie in Abbildung 4.4 gezeigt, aus einem Mikroprozessor, Speicher und peripheren Schnittstellen. Der Mikroprozessor enthält ein Rechen- und Steuerwerk zur Adressierung und Manipulation von Daten, sowie zur Steuerung des zeitlichen und logischen Ablaufs eines Programms. Als Speicher für veränderbare Daten wird ein Schreib-Lese-Speicher und für Programmbefehle und feste Parametersätze ein Nur-Lese-Speicher benötigt. Die Ein- und Ausgabeeinheiten bestehen im Allgemeinen aus AD- bzw. DA-Wandlern, Pulsweitenmodulen, Ereigniszählern, seriellen und parallelen Schnittstellen zur Kommunikation mit externen Komponenten oder anderen Mikrocontrollern.

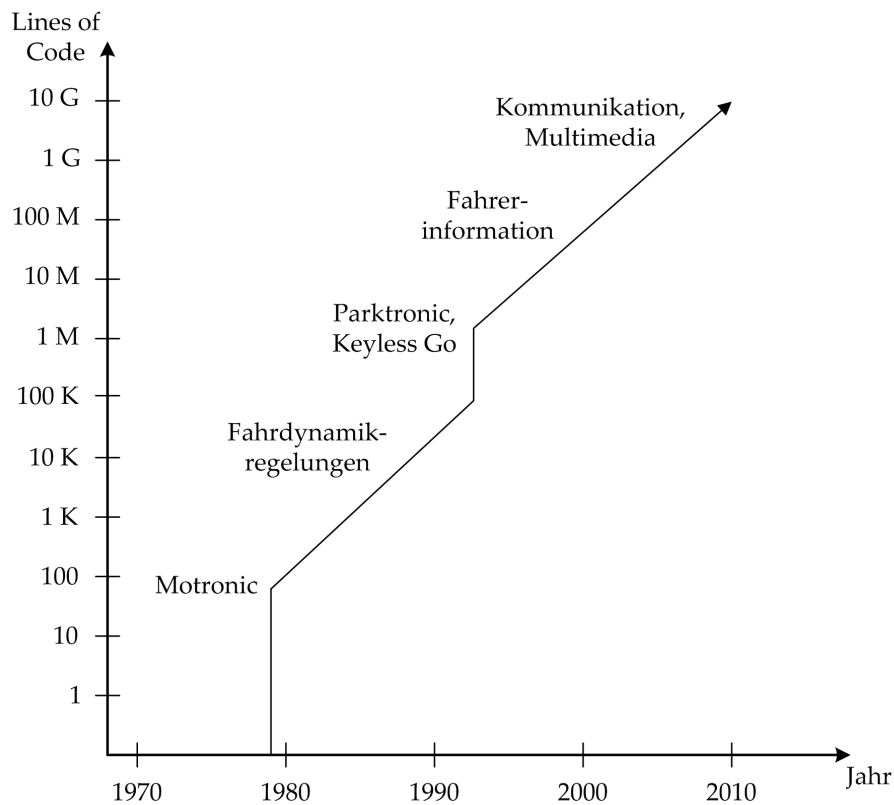


Abbildung 4.3: Entwicklung des Softwareumfangs im Kfz [20]

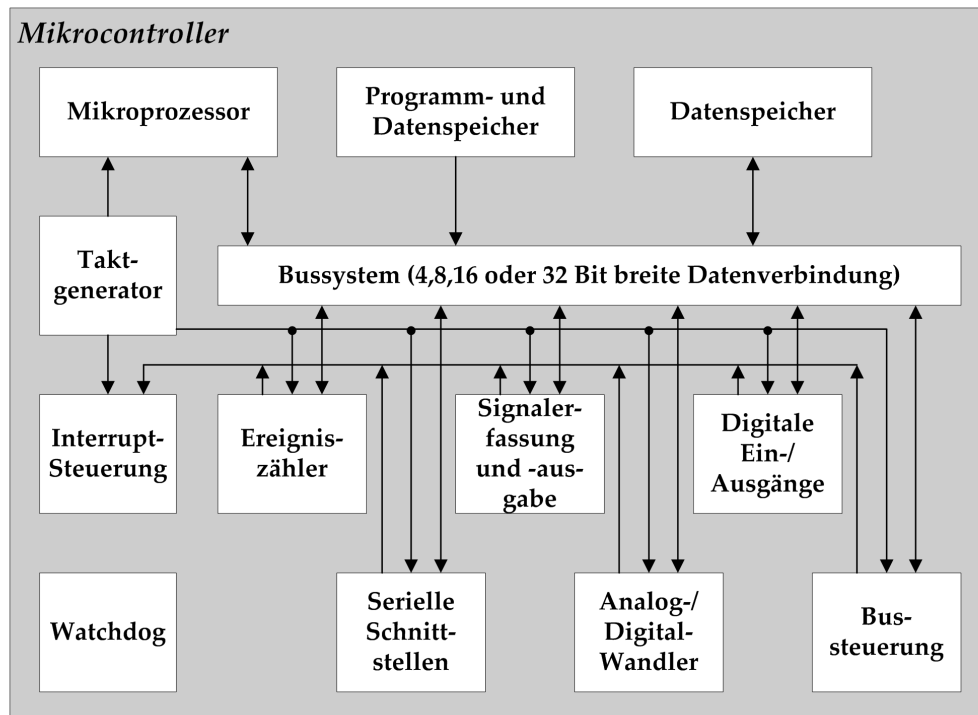


Abbildung 4.4: Aufbau eines Mikrocontrollers

4.1.3 Kommunikation

Zur Erfüllung der Vielzahl an Fahrzeugfunktionen hat sich das Bordnetz zu einem verteilten und vernetzten System entwickelt. Ein verteiltes und vernetztes System besteht laut Definition in [79] aus mehreren Subsystemen, die miteinander kommunizieren, wobei sowohl die Steuerung als auch die Hardware und die Daten zumindest teilweise dezentral organisiert sind. Es ist häufig aus mehreren Mikroprozessoren mit jeweils eigenem Speicher aufgebaut, wobei die Prozessoren durch ein Kommunikationsnetz miteinander verbunden sind. Die Steuerung erfolgt in den unterschiedlichen Subsystemen parallel und übernimmt zusätzlich die Koordination der nebenläufigen Aufgabeneinheiten.

Verteilte und vernetzte Systeme im Fahrzeug haben gegenüber zentralen Systemen folgende Vorteile:

- Reduzierung des Verkabelungsaufwandes durch räumliche Verteilung von Einzelsystemen
- Bessere Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit und damit Kostenvorteile bei Sonderausstattungen
- Implementierung komplexerer Funktionalitäten

- Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit durch ausfalltolerante Auslegung

Das Kommunikationsnetz im Fahrzeug kann, wie in Abbildung 4.5 am Auszug einer Steuergerätevernetzung dargestellt, in Abhängigkeit von der geforderten Datenrate und -geschwindigkeit aus verschiedenen Bussystemen bestehen. Stand der Technik im Fahrzeug sind die Bussysteme CAN (Controller Area Network), LIN (Local Interconnect Network), MOST (Media Oriented Systems Transport), FlexRay und die K-Line.

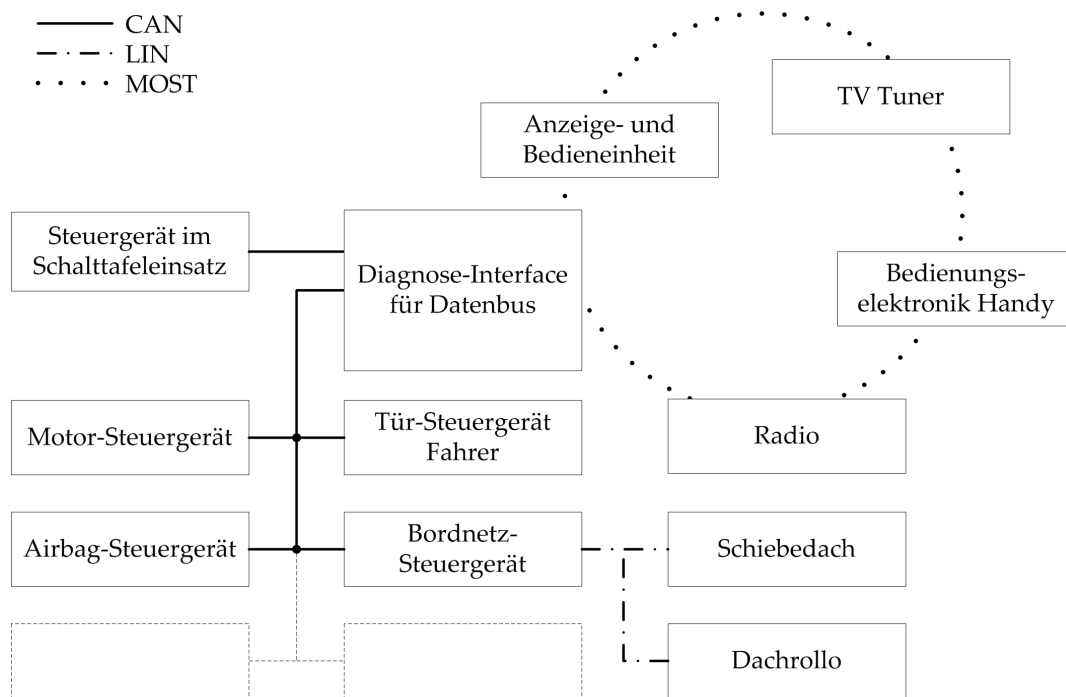


Abbildung 4.5: Auszug einer Fahrzeugvernetzung

4.1.3.1 CAN

Der CAN-Bus ist ein asynchrones, serielles Bussystem, das für die Vernetzung der Kfz-Steuergeräte im Jahr 1983 von der Firma Bosch entwickelt und zusammen mit der Firma Intel 1985 vorgestellt wurde. Der CAN-Bus arbeitet nach dem Multi-Master-Prinzip und verwendet das CSMA/CA-Verfahren, bei dem Datenkollisionen beim Buszugriff mehrerer Steuergeräte durch eine bitweise Arbitrierung vermieden werden.

Es wird zwischen Highspeed- und Lowspeed-CAN unterschieden, bei denen die maximalen Datenübertragungsraten 1 Mbit/s bzw. 125 kbit/s betragen. Über den

Highspeed-CAN werden unter anderem die Motorelektronik, die Getriebesteuerung, der Airbag und das Anti-Blockier-System vernetzt. Komfortsysteme wie z. B. die Tür- und Sitzsteuergeräte werden über den Low-speed-CAN betrieben. Der CAN-Bus ist im Fahrzeug überwiegend als Linienstruktur aufgebaut, wobei Stichleitungen in begrenztem Umfang zulässig sind. Der Bus ist entweder mit Kupferleitungen oder über Glasfaser ausgeführt. Bei Verwendung von Kupferleitungen arbeitet der CAN-Bus mit Differenzsignalen. Hierzu werden vorwiegend 3 Leitungen ausgeführt, die mit CAN-High, CAN-Low und CAN-Gnd bezeichnet werden.

4.1.3.2 LIN

Im Jahr 1999 wurde damit begonnen, den LIN-Bus speziell für die kostengünstige Kommunikation von Sensoren und Aktoren zu entwickeln. Es handelt sich hierbei um ein lokales Bus-System, mit dem bis zu 16 Teilnehmer miteinander vernetzt werden können. Die höchste spezifizierte Bruttodatenrate des LIN-Bus liegt bei 20 kbit/s. Der Datenaustausch ist aufgrund des Master-Slave-Protokolls nicht so flexibel wie der CAN. Der LIN-Bus wird dort eingesetzt, wo die Bandbreite und Flexibilität von CAN nicht benötigt wird, wie z. B. bei der Vernetzung des Schiebedachs mit dem Bordnetz-Steuergerät. Aus Kostengründen wird der LIN-Bus zukünftig eine weitergehende Verbreitung im Fahrzeug erfahren.

4.1.3.3 MOST

MOST ist ein serielles Bussystem zur Übertragung von Video-, Audio-, Sprach- und Datensignalen über Lichtwellenleiter, welches auf synchroner Datenkommunikation basiert. Es wird für die multimedialen Anwendungen wie Radio, Telefon oder Fernsehen im Fahrzeug verwendet. Ein MOST-Netzwerk wird meistens als Ring ausgeführt und kann bis zu 64 Geräte umfassen. Die Übertragung von Paketdaten und Streaming-Daten umfasst eine Bandbreite von bis zu 23 Mbit/s. MOST unterstützt bis zu 15 MPEG1-Kanäle zur Audio-Video-Übertragung oder bis zu 15 unkomprimierte Stereo-Audio-Kanäle. Die Übertragung von hochauflösenden, unkomprimierten Videodatenströmen ist dagegen noch nicht möglich. Weiterhin bietet MOST einen Kanal zur Übertragung von Kontrollbotschaften.

4.1.3.4 FlexRay

Im Hinblick auf die steigenden Anforderungen zukünftiger Vernetzung durch höhere Bandbreiten, Echtzeitfähigkeit und Ausfallsicherheit wurde im Jahr 2000 ein

Konsortium von den Firmen BMW, Daimler Chrysler, Phillips und Motorola gegründet, dem mittlerweile auch Volkswagen, General Motors und Bosch als Core-Partner angehören. Das Konsortium entwickelte mit dem FlexRay ein serielles, deterministisches und fehlertolerantes Bussystem. Es arbeitet nach dem TDMA-Verfahren, bei dem die Nachrichten feste Zeitfenster in definierten Zyklen zugewiesen werden. Der Nachteil der festen Zeitfenster ist, dass die Bandbreite nicht voll ausgenutzt werden kann. FlexRay unterteilt daher den Kommunikationszyklus in einen statischen und einen dynamischen Bereich. Im dynamischen Bereich werden die Zeitfenster im Gegensatz zum statischen Bereich nicht mehr fest vorgegeben. FlexRay kommuniziert über zwei physikalisch getrennte Kanäle mit einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von 10 Mbit/s. Die beiden Kanäle werden vorwiegend für die redundante Nachrichtenübertragung genutzt. Sie können aber auch unterschiedliche Nachrichten übertragen, wodurch die doppelte Datenrate erreicht wird.

4.1.3.5 K-Line

Um mögliche auftretende Fehlfunktionen beispielsweise durch das Versagen eines Sensors oder Aktors zu detektieren und zu kommunizieren, gehört ein Diagnosesystem zum Grundumfang eines Seriensteuergerätes. Die K-Line ist eine bidirektionale Datenleitung zur Übertragung von Diagnoseinformationen zwischen dem Fahrzeug und einem Werkstatt-Diagnosegerät. Die maximal erreichbare Datenrate beträgt 10400 bit/s. Bei den Fehlerdiagnosefunktionen wird zwischen Off-Board- und On-Board-Diagnosefunktionen unterschieden. Unter Off-Board-Diagnose wird die Ausführung der Fehlererkennungsfunktionen auf einem externen Diagnosetester bezeichnet. Falls die Fehlererkennungsfunktionen im Steuergerät durchgeführt werden, so werden diese als On-Board-Diagnosefunktionen bezeichnet. Im Fehlerfall führt die On-Board-Diagnosefunktion eine Fehlerbehandlung aus und nimmt zusätzlich einen Eintrag im Fehlerspeicher des Steuergerätes vor, der mit einem Diagnosetester ausgelesen werden kann.

4.1.4 Sensorik

Ein Sensor ist ein technisches Bauteil, das eine physikalische oder chemische Größe unter Berücksichtigung von Störgrößen in eine elektrische Größe umwandelt. Dabei wird zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden. Aktive Sensoren wandeln nicht-elektrische Größen direkt in elektrische Größen um und wirken somit wie elektrische Spannungsquellen. Aktive Sensoren nutzen zum Beispiel für die Erfassung von taktilen und visuellen Größen den piezoelektrischen Effekt bzw. den Fotoeffekt aus. Passive Sensoren benötigen eine Hilfsenergie, wobei beispielsweise

der ohmsche Widerstand, die Kapazität oder die Induktivität durch die zu messende Größe beeinflusst wird.

Die Anwendungen der Sensoren dienen vorwiegend für Steuerungs- und Regelungsaufgaben, sowie für die Fahrzeugsicherheit und Onboard-Diagnose. Tabelle 4.1 zeigt einige ausgewählte Beispiele der im Fahrzeug eingesetzten Sensorarten. Der Trend

Sensorart	Messgröße im Kfz
Elektrisch	Winkel, Position
Magnetisch	Drehzahl, Position
Chemisch	Sauerstoff-Partialdruck, Luftgüte
Thermisch	Luftmassen-, Abgasmassenstrom
Mikromechanisch	Drehrate, Beschleunigung
Schall	Abstand, Relativgeschwindigkeit

Tabelle 4.1: Übersicht der im Fahrzeug verbauten Sensorarten

im Bereich der Kfz-Sensorik geht weg von der Signalverarbeitung im Steuergerät hin zur hybriden oder monolithischen Integration von Sensor- und Signalelektronik an der Messstelle einschließlich digitaler Schaltungen wie Analog-Digital-Umsetzer und Mikrocomputer. Die Vorteile dieser Lösung sind im Wesentlichen die Entlastung des Steuergerätes, eine einheitliche und busfähige Schnittstelle mit der Möglichkeit der Mehrfachnutzung von Sensoren und die Reduzierung von Messfehlern durch Korrekturmodelle. [11]

4.1.5 Aktuatorik

Ein Aktor beschreibt im Allgemeinen ein Stellglied, das eine Eingangsgröße in eine andersartige Ausgangsgröße umwandelt. Die im Bordnetz verbauten Aktoren wandeln hauptsächlich elektrische Energie in Wärmeenergie, Lichtenergie und mechanische Energie um.

Die Aktorengruppen Elektromotoren, Heizelemente und Leuchtmittel verursachen den größten Anteil an der installierten Bordnetzleistung und haben somit einen wesentlichen Einfluss auf das Bordnetzverhalten und die Dimensionierung der Energieversorgung. Abbildung 4.6 zeigt die prozentualen Anteile an der installierten Gesamtbordnetzleistung dieser Aktorengruppen am Beispiel eines Mittelklassefahrzeugs, bei der nur Komponenten berücksichtigt wurden, die eine Stromaufnahme

größer als 1A haben. Hier zeigt sich, dass Elektromotoren den weitaus größten Anteil ausmachen. Im Folgenden werden die Merkmale dieser Aktorenklassen erläutert.

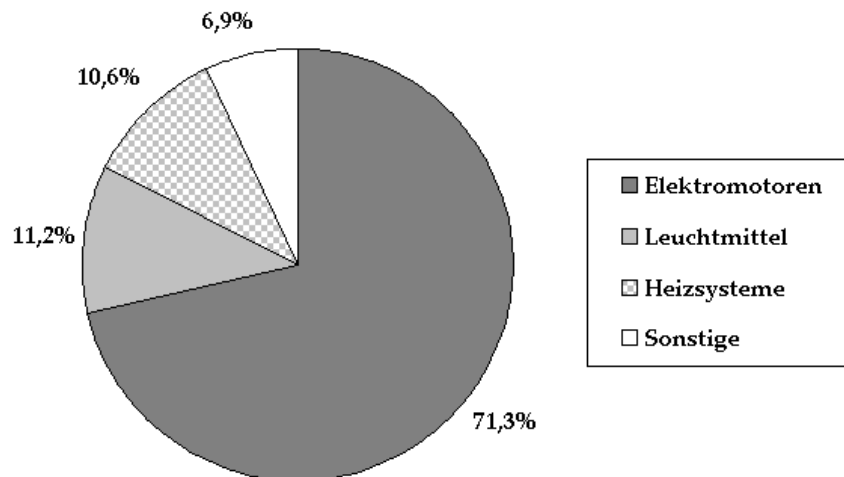


Abbildung 4.6: Anteile der verbauten Aktoren an der installierten Bordnetzleistung

4.1.5.1 Elektromotoren

Elektromotoren bestehen aus einem feststehenden Teil (Ständer) und einem rotierenden Teil (Läufer). Davon abweichend existieren Sonderbauformen wie z. B. der Linearmotor, der eine translatorische Bewegung erzeugt. Im Ständer und Läufer können sowohl durch Dauermagneten als auch durch mehrere stromdurchflossene Spulen magnetische Felder erzeugt werden, die zwischen den beiden Maschinenteilen eine Kraft und damit ein Drehmoment bewirken. Die räumliche Anordnung der Wicklungen und die Verwendung der Stromart führen zu verschiedenen Bauarten der Elektromotoren.

Die grundlegenden Eigenschaften elektrischer Motoren hängen unter anderem damit zusammen, wie die Motorwicklungen an die Spannung gelegt werden. Motoren werden als selbstgeführt bezeichnet, wenn das zyklische Einschalten der Wicklungsstränge abhängig von der Läuferstellung selbsttätig erfolgt. Dagegen wird bei fremdgeführten Motoren das zyklische Einschalten der Stränge zwangsweise durch das speisende Netz bzw. die Steuerelektronik bestimmt. Von den in der folgenden Übersicht dargestellten wichtigsten Arten elektromagnetischer Kleinantriebe werden heutzutage überwiegend permanentmagneterregte Gleichstrommotoren (PM-DC-Motoren), elektronisch kommutierende Motoren (EC-Motoren) und Schrittmotoren im Kraftfahrzeug eingesetzt.

- Selbstgeführte Motoren
 - Mechanischer Kommutator
 - * Wechselstrommotoren (Universalmotor)
 - * Gleichstrommotoren
 - * Neben-, Doppel-, Reihenschlussmotor
 - * fremd- und permanentmagneterregter Motor
 - Elektronischer Kommutator (EC-Motoren)
 - * Geschalteter Reluktanzmotor
 - * Motor mit Magnetläufer (Block- und Sinusstromtechnik)
- Fremdgeführte Motoren
 - Lastabhängige Drehzahl (Asynchron)
 - * Drehstrommotor (Käfigläufer)
 - * Kondensatormotor
 - * Widerstandshilfsstrangmotor
 - * Spaltpolmotor
 - Frequenzstarre Drehzahl (Synchron)
 - * Drehstrommotor (Magnet-, Hybridläufer)
 - * Magnet-, Reluktanz-, Hysteresemotor
 - * Schrittmotoren (Magnet-, Reluktanz-, Hybridschrittmotoren)

Ein Schrittmotor ist ein Synchronmotor, bei dem der Rotor um einen definierten Winkel durch impulsförmiges Ansteuern der Statorwicklungen gedreht werden kann. Auf diese Weise kann man jeden Drehwinkel anfahren, wenn er ein Vielfaches des minimalen Drehwinkels ist.

Der Ständer des PM-DC-Motors besteht aus einem Dauermagneten. Im Läufer sind die Spulen in den Nuten des Eisenpaketes verteilt und an einen Stromwender (Kommutator) angeschlossen. Im Ständergehäuse schleifen Kohlebürsten auf dem Kommutator und übertragen hierüber den Strom in die Läuferwicklungen. Durch die Drehbewegung des Kommutators wechselt die Stromrichtung in den Läuferwicklungen, wodurch ein gleichförmiges Drehmoment gewährleistet wird. Die Nachteile des PM-DC-Motors sind die Bürstengeräusche, der Verschleiß der Kohlebürsten und das Bürstenfeuer. Trotz dieser Nachteile hat sich der PM-DC-Motor aufgrund seiner

geringen Kosten, des hohen Wirkungsgrades und der einfachen und günstigen Ansteuerungselektronik im Kraftfahrzeug etabliert. [86]

Zunehmend Verbreitung im Kfz findet der EC-Motor. Von der Konstruktion her handelt es sich um eine permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine. Die Wicklungen des EC-Motors werden in Abhängigkeit der Rotorposition von einer Steuer- und Leistungselektronik aus einem Gleichspannungsnetz versorgt. Das elektronische Weiterschalten der Ströme in der Ständerwicklung ergibt die Drehzahl-Drehmoment-Abhängigkeit eines fremderregten Gleichstrommotors. Im Gegensatz zur klassischen Ausführung des Gleichstrommotors sind die magnetischen Funktionen von Stator und Rotor vertauscht.

Die elektronische Kommutierung beseitigt die Nachteile des PM-DC-Motors, wodurch die Lebensdauer nur durch die Standzeit der Läuferlagerung begrenzt wird. Aufgrund der elektronischen Steuerung können Antriebe mit EC-Motoren Zusatzfunktionen übernehmen, wie stufenlose Drehzahlregelung, Drehrichtungsumkehr, Sanftanlauf und Blockierschutz. Die damit verbundenen Nachteile der EC-Motoren sind die aufwendigere und teurere Elektronik.

Es ist zu diesem Zeitpunkt schwer abzuschätzen, ob die EC-Motoren den PM-DC-Motor aus dem Fahrzeug verdrängen werden. Für die Auswahl des Elektromotors sind im Wesentlichen die Kosten sowie Art und Umfang der Applikation maßgeblich. Betrachtet man beispielsweise einen ungeregelten Elektromotor für ein Kühlgebläse, so wird dieser durch einen EC-Motor zur Bereitstellung eines Drehmomentes teurer sein als ein vergleichbarer PM-DC-Motor. Werden dagegen eine stufenlose Drehzahlregelung mit höherem Wirkungsgrad, ein axial kürzerer Antrieb und zusätzliche Diagnosefunktionen für das Kühlgebläse gefordert, so ist der Einsatz eines EC-Motors vorzuziehen. [72] Dieses Beispiel zeigt, dass sowohl der PM-DC-Motor als auch der EC-Motor ihre Daseinsberechtigung im Kfz haben können.

4.1.5.2 Heizelemente

Ein Heizelement ist ein Bauteil, mit dem einem Stoff Wärmeenergie zugeführt werden kann. Im Fahrzeug werden hierfür Heizleiter eingesetzt. Der Werkstoff des Heizleiters hat einen geringen Prozentsatz an Legierungsbestandteilen, da schon kleine Unregelmäßigkeiten im Gitteraufbau eine erhöhte Wärmeabgabe beim Stromfluss verursachen. Da Heizleiter schnell mit kleiner Energieaufnahme hohe Temperaturen erreichen sollen, müssen diese gute Wärmeleitfähigkeiten und kleine spezifische Wärmekapazitäten haben. Weiterhin muss gewährleistet sein, dass es durch die hohen Temperaturen nicht zu Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe kommt. Die Hauptbestandteile dieser Werkstoffe sind vorwiegend Aluminium, Chrom, Eisen und Nickel.

Der Transport der im Heizleiter erfolgten Wärme zu dem zu erwärmenden Stoff kann als Wärmeleitung, Wärmeströmung oder als Wärmestrahlung erfolgen. Im Fahrzeug sind die Wärmeleitung und -strömung die wichtigsten Ausbreitungsformen. Als Beispiele für die Wärmeleitung seien die Sitzheizung und für die Wärmeströmung das Innenraumgebläse genannt.

4.1.5.3 Leuchtmittel

Es wird bei der Art der Leuchtmittel zwischen Temperaturstrahler und Gasentladungslampen unterschieden. Diese werden im Wesentlichen durch die Art der Elektronenanregung charakterisiert. Bei Temperaturstrahlern wird das Energieniveau durch Zufuhr von Wärme erhöht. Die im Fahrzeug verbauten Temperaturstrahler sind Glüh- und Halogenlampen. Der Glühwendel der Glühlampe besteht aus Wolfram, dessen Verdampfung und die damit verbundene Schwärzung des Lampenkolbens die Lebensdauer begrenzen. Bei der Halogenlampe ist die Lampe mit den Gasen Jod oder Brom gefüllt, wodurch sich verdampftes Wolfram mit dem Füllgas verbindet und durch Konvektion zur Wendel zurückgelangt. Dort zersetzt es sich aufgrund der hohen Wendeltemperatur und bildet auf der Wendel eine gleichmäßige Wolframablagerung. Durch diesen Kreisprozess wird die Lebensdauer im Gegensatz zur Glühlampe deutlich erhöht. Der Nachteil der Halogenlampen ist aber die geringere Lichtausbeute.

Im Gegensatz zu den Temperaturstrahlern wird bei den Gasentladungslampen ein Lichtbogen zwischen zwei exakt positionierten Elektroden gezündet und aufrecht erhalten. Um diesen Lichtbogen zu erzeugen, sind Spannungen von 8 kV bis 12 kV erforderlich; für eine sichere Funktion im Betrieb sind ungefähr 70 V bis 100 V notwendig. Die Gasatome werden dabei durch Elektronenstöße angeregt und geben ihre Energie in Form von Lichtstrahlung ab. Die Vorteile dieses Prinzips sind die hohe Lichtausbeute von etwa 85 lm/w und die lange Lebensdauer. In Kraftfahrzeugen wird heutzutage Xenon als Gas für die Entladungslampen verwendet.

Der Trend der letzten Jahre ist die Einführung der LED (Light-Emitting Diode) im Kraftfahrzeug. Neben der Nutzung der LED als Anzeigeelement werden sie heutzutage auch als Blinker, Bremsleuchten und Leselichter eingesetzt. Die LED besteht aus einem Halbleiterelement mit PN-Übergang, wo beim Betrieb in Durchlassrichtung die Ladungsträger rekombinieren und dabei den frei werdenden Energiebetrag bei bestimmten Halbleitermaterialien in elektromagnetische Strahlungsenergie umwandeln. Die LED gehört zu den Elektrolumineszenzstrahlern und basiert am häufigsten auf Halbleiterverbindungen, die aus Elementen der 3. und 5. Gruppe des Periodensystems bestehen, wie beispielsweise Galliumphosphid und Aluminiumgalliumarsenid.

Der Einsatz der LED im Kraftfahrzeug hat mehrere Gründe. LEDs sind auf der einen Seite sehr robust gegenüber mechanischen Beanspruchungen und auf der anderen Seite sehr langlebig, energiesparend und effizient. Zum Vergleich wandeln blaue LEDs 60 % mehr Energie in Licht um als Glühlampen. Die Lebensdauer der LED beträgt ca. 50000 Stunden und liegt somit weit über den 2000 Betriebsstunden der Glühlampe. Ein weiterer wichtiger Aspekt für den Einsatz der LED im Kfz ist, dass LEDs in weniger als 1ms ihre maximale Lichtleistung erreichen, während Glühlampen etwa 200 ms benötigen. Nachteilig wirkt sich der geringe Lichtstrom der LED aus, was den Einsatz der LED als Scheinwerfer zur Zeit noch verhindert.

Zukünftig werden neben den LEDs auch sogenannte OLEDs (Organic Light-Emitting Diode) im Kraftfahrzeug eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um ein sehr dünnes, leuchtendes Bauelement aus organischen, halbleitenden Materialien, dessen Aufbau einer LED ähnelt. Die geringen Herstellungskosten der OLEDs führen zu einem wesentlichen Vorteil gegenüber der LED. Bildschirmanzeigen und Anzeigen mit OLED-Technologie bieten nach derzeitigem Stand Einsatzmöglichkeiten im Kraftfahrzeug.

4.1.6 Ansteuerung

Bei der elektronischen Ansteuerung der Aktoren im Kraftfahrzeug sind drei wesentliche Grundfunktionen zu unterscheiden:

- Ein- und Ausschaltung
- Pulsweiten-Modulation (PWM)
- Linearregelung (Analoge Spannungsregelung)

Die Linearregelung spielt dabei in der Kraftfahrzeugelektronik aufgrund des hohen Schaltungsaufwandes und der zum Teil nicht tolerierbaren Verlustleistung eine untergeordnete Rolle. Die Ein- und Ausschaltung und die PWM haben im Gegensatz zur Linearregelung den Vorteil, dass der elektronische Schalter im Steuergerät grundsätzlich digital arbeitet und somit entweder voll leitend oder voll gesperrt ist. Die PWM erzielt dadurch eine erhebliche Reduzierung der Verlustleistung im Schaltelement. Beispiele für den Einsatz der PWM in der Kraftfahrzeugelektronik sind die Dimmung von Leuchtmitteln, Drehzahlregelung bei Elektromotoren und die Leistungsregelung bei Heizsystemen.

Die Taktfrequenz der PWM reicht von wenigen Hertz für die Heizsysteme bis zu über 20 kHz für die Elektromotoren. Die Taktfrequenzen bei den Elektromotoren liegen oberhalb des menschlichen Hörbereichs (> 16 kHz), weil der Elektromotor konstruktionsbedingt akustische Schwingungen erzeugt. Die maximale PWM-Taktfrequenz

ist durch die bei höheren Schaltfrequenzen steigende Verlustleistung im Schaltelement begrenzt. Der Nachteil der PWM ist, dass durch die Schaltflanken und hohen Taktraten viele nieder- und hochfrequente Oberwellen erzeugt werden, die ein erhebliches elektromagnetisches Störspektrum in das Bordnetz zurückspeisen bzw. in die Umwelt abstrahlen. Hieraus können für die Fahrzeuginsassen wahrnehmbare Effekte wie beispielsweise Helligkeitsschwankungen bei den Leuchtmitteln oder Knacken in den Lautsprechern auftreten. Um diese Störungen zu minimieren, werden einerseits in Abhängigkeit der Leistungsklassen der Aktoren die optimalen Taktfrequenzen bestimmt und andererseits in den Versorgungsleitungen der in Abbildung 4.7 dargestellte unsymmetrische Π -Filter eingesetzt.

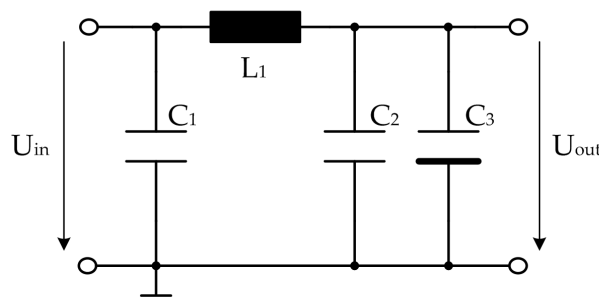


Abbildung 4.7: Schaltungsaufbau eines Π -Filters

Um komfort- und funktionsrelevante Spannungsabweichungen durch mögliche Überlastanforderungen einiger Aktoren im Bordnetz zu begrenzen, besteht die Möglichkeit, entweder durch zusätzliche Induktivitäten in der jeweiligen Ansteuerungseinheit die Stromsteilheit zu reduzieren oder eine spannungsgeführte Leistungsreduktion durchzuführen. Bei einer spannungsgeführten Leistungsreduktion wird über eine im Steuergerät abgelegte Kennlinie die maximal mögliche Leistungsaufnahme eines Aktors mit einer Verringerung der Spannung herabgesetzt.

In Abhängigkeit von der Höhe der Lastströme werden verschiedene elektronische Bauteile als Schaltelemente eingesetzt. Für die Ansteuerung von Aktoren mit einer Stromaufnahme kleiner 1 A ist die Verwendung in einzelnen Fällen von Bipolar-Transistoren denkbar. Für höhere Ströme werden vorwiegend MOS-Power-Transistoren eingesetzt.

Bei der Schaltungsanordnung wird dabei, wie in Abbildung 4.8 dargestellt, zwischen Low- und High-Side-Schaltern unterschieden. Der Transistor ist bei Low-Side-Schaltern einseitig mit der Masse verdrahtet, wodurch der eine Kontakt des Aktors immer mit dem positiven Potenzial der Spannungsversorgung verbunden ist. Daraus resultiert der Nachteil, dass beispielsweise der Kommutator eines Elektromotors oder offene Kontakte bei Feuchtigkeit ein galvanisches Element bilden, was zu Beschädigungen bzw. Zersetzungen führen kann. In den meisten Fällen wird daher

von dem Einsatz eines Low-Side-Schalters abgesehen. [46] Im Gegensatz zu Low-Side-Schaltern wird beim High-Side-Schalter der Aktor einseitig mit der Masse verbunden, so dass im abgeschalteten Zustand der Aktor spannungsfrei ist. Derartige Schaltungslösungen verhindern das Auftreten von galvanischen Elementen.

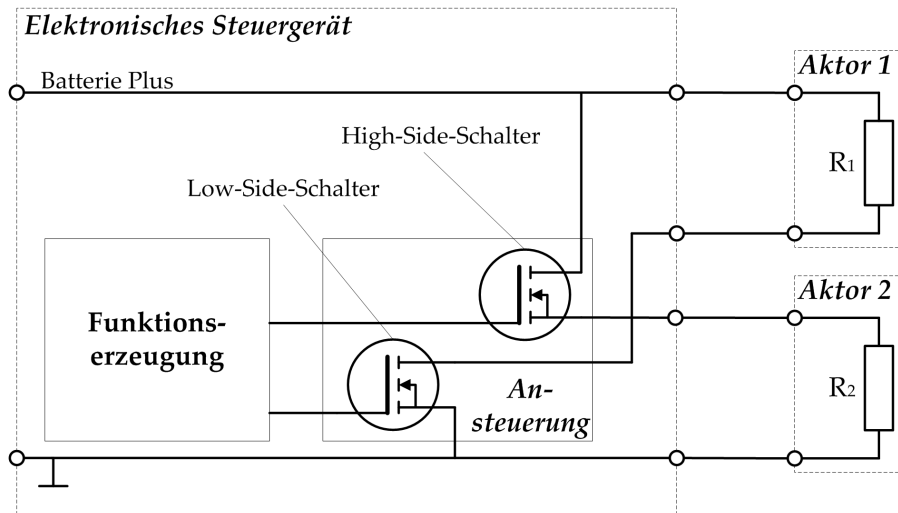


Abbildung 4.8: Aktorenansteuerung über einen Low- und High-Side-Schalter

Ein MOS-Power-Transistor benötigt zum Durchsteuern eine ausreichend hohe Spannung zwischen Gate und Source. Aus diesem Grund wäre die Verwendung eines P-Kanal-MOS-Power-Transistors als High-Side-Schalter die einfachste Lösung, weil für das Durchschalten des Transistors nur das Gate auf Masse gezogen werden muss. Aufgrund der Halbleitereigenschaften sind vergleichbare N-Kanal-MOS-Power-Transistoren aber wesentlich kostengünstiger als P-Kanal-MOS-Power-Transistoren und werden daher für die Ansteuerung der Aktoren vorgezogen.

Im Gegensatz zum P-Kanal-MOS-Power-Transistor muss am Gate des N-Kanal-MOS-Power-Transistors als High-Side-Schalter eine höhere Spannung als die Versorgungsspannung anliegen, damit der Transistor durchschaltet. Hierfür wird eine Spannungsverdoppler- oder Boot-Strap-Schaltung [38] benutzt, deren zusätzlicher Schaltungsaufwand aber im Vergleich zu den Kosten eines P-Kanal-Power-Transistors vertretbar ist.

Aufgrund des erhöhten externen Bauteilaufwandes gibt es mittlerweile CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)-Bausteine, die neben dem MOS-Power-Transistor und einer Spannungsverdoppler-Schaltung folgende Funktionen beinhalten:

- Temperaturmessung
- Ausgangsstrommessung inkl. Stromgradienten

- Steuerlogik
- Diagnosefunktion
- Überspannungs- und Verpolschutz

4.2 Energieversorgung des Bordnetzes

Die elektrische Energie für das Bordnetz kann aus unterschiedlichen Energieformen gewonnen werden. Hierzu zählt die direkte Umwandlung von mechanischer oder chemischer Energie in elektrische Energie. Zur Pufferung von hohen Leistungsanforderungen und zur Versorgung des Bordnetzes im Ruhezustand werden zusätzlich Energiespeicher verbaut. Des Weiteren sind bei Zweispannungsebenen, wie z. B. in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zwischen Traktions- und Bordnetz, Energieumsetzer erforderlich.

In den folgenden Kapiteln werden die in Fahrzeugen verbauten Energieversorgungskomponenten für die Energiewandlung, Energieumsetzung und Energiespeicherung vorgestellt. Abschließend wird kurz auf die Energieverteilung zwischen Energieversorgungskomponenten und die Verbraucher eingegangen.

4.2.1 Energiewandler

Als Energiewandler von mechanischer in elektrische Energie werden in Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben heutzutage Klauenpolgeneratoren eingesetzt. Dagegen finden in Hybridfahrzeugen mit einem Hybridisierungsgrad bis zum Mild-Hybrid integrierte Startergeneratoren Anwendung. Vom Antriebskonzept unabhängig sind die Auxiliary Power Units, die direkt aus chemischer Energie elektrische Energie für das Bordnetz liefern.

4.2.1.1 Klauenpolgenerator

Der Klauenpolgenerator ist eine Sonderbauform der Synchronmaschine. Der Unterschied zu den üblichen Synchrongeneratoren liegt im Läuferaufbau. Der Läufer besteht aus zwei klauenförmigen Polplatten und einer konzentrisch zwischen den Polplatten liegenden Gleichstromwicklung. [36] Die Ausgangsleistung des Klauenpolgenerators ist bei konstanter Ausgangsspannung abhängig von der Drehzahl und dem Erregerstrom. Die maximale Ausgangsleistung ist durch den maximalen Erregerstrom limitiert. Außerdem nimmt die Leistung mit steigender Temperatur

aufgrund der damit verbundenen Erhöhung des ohmschen Widerstandes der Erregerwicklung ab. Abbildung 4.9 zeigt den Strom/Drehzahl-Verlauf eines 100 A-Generators. Aus der Kennlinie wird ersichtlich, dass eine Mindestdrehzahl für die Stromabgabe notwendig ist, weil bei niedrigen Drehzahlen die induzierte Spannung geringer als die Batteriespannung ist. Bei sehr hohen Drehzahlen erreicht der Generator den Kurzschlussbereich, wodurch die maximale Stromabgabe begrenzt wird.

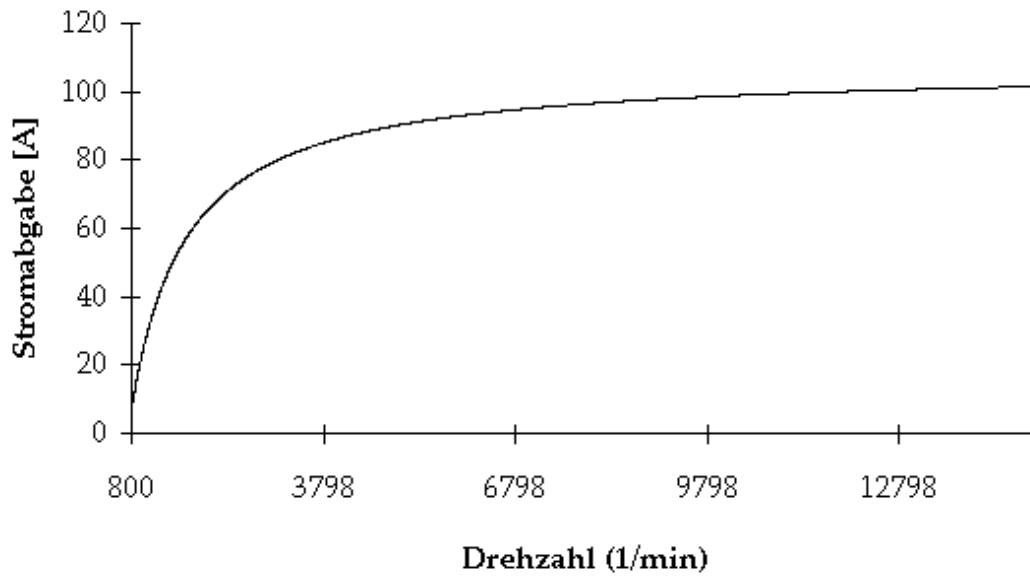


Abbildung 4.9: Stromabgabe eines 100A Klauenpolgenerators in Abhängigkeit von der Drehzahl

Der Wirkungsgrad des Klauenpolgenerators wird im Wesentlichen durch Kupferverluste im Ständer, Eisenverluste und Läuferverluste bestimmt. Da diese Verluste drehzahlabhängig sind, kommt es zu einem starken Abfall des Generatorwirkungsgrades bei hohen Drehzahlen. Der vom Generator erzeugte Drehstrom wird durch eine B6-Diodenbrücke gleichgerichtet. Weiterhin dient die Diodenbrücke als Rückstromsperre, so dass ein Entladen der Batterie über den Generator vermieden wird. Mit der Gleichrichtung ist immer ein Restbetrag an überlagerter Wechselspannung verbunden, die bei der Auslegung des Bordnetzes berücksichtigt werden muss.

Spannungsregelung

Der Spannungsregler hat die Aufgabe, während des Fahrbetriebes ein nahezu konstantes Spannungsniveau im Bordnetz unabhängig von der Belastung über den gesamten Drehzahlbereich des Fahrzeugmotors zu halten. Dabei schützt dieser die Komponenten vor Überspannung und verhindert die Überladung der Batterie. Weiterhin berücksichtigt er die chemischen Batterieeigenschaften durch eine temperaturabhängige Sollwertverschiebung. Bei tiefen Temperaturen liegt die Sollspannung

etwas höher, um die durch Kälte erschwerte Batterieladung zu optimieren. Dagegen wird der Sollwert bei hohen Temperaturen zur Vermeidung einer Batterieüberladung reduziert. Bei der Spannungsregelung handelt es sich um einen Zweipunkt-Regler, der auf ein Toleranzband um die Sollspannung reagiert. Als Stellgröße wird hierzu der Erregerstrom verwendet, wobei die stufenlose Adaption an die Drehzahl automatisch erfolgt. Das Verhältnis des aktuellen Erregerstromes zum maximalen Erregerstrom wird über das so genannte DFM-Signal ausgegeben. Damit ist es möglich, die Auslastung des Generators im Fahrbetrieb zu beurteilen.

Neben Standardreglern werden auch Multifunktionsregler eingesetzt, die neben dem Spannungsregler eine „Load Response“-Funktion und eine Fehlerdiagnose für Unter- und Überspannung, Erregungsunterbrechung oder Keilriemenbruch besitzen. Bei der „Load Response“-Funktion wird die Zunahme der Ausgangsleistung zeitlich begrenzt, um das Lauf- und Abgasverhalten des Verbrennungsmotors zu verbessern. Hieraus resultiert, dass im unteren Drehzahlbereich die Erregung des Generators über eine Rampe nachgefahren wird, um Drehmomentstöße zu vermeiden. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass im Bordnetz auftretende Leistungssprünge erst verzögert ausgeregelt werden und somit die Batterie als Puffer eingreifen muss. Folglich sind Spannungseinbrüche und eine erhöhte Zyklisierung der Batterie möglich.

4.2.1.2 Integrierter Startergenerator

Der integrierte Startergenerator (ISG) fasst die Funktionen des Anlassens und der elektrischen Energiebereitstellung in einer Drehstrommaschine zusammen. Der ISG kann somit sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden. Die Integration in den Antriebsstrang kann einerseits in den Riemenantrieb des Verbrennungsmotors (Riemengetriebener Startergenerator) und andererseits direkt mit der Kurbelwelle gekoppelt werden (Kurbelwellenstartergenerator).

Als Drehstrommaschine wird sowohl die Asynchron- als auch die Synchronmaschine eingesetzt. Der Leistungsbereich kann von 3 kW bis 10 kW bei einer Spannung bis 42 V reichen. Gerade im unteren Drehzahlbereich liegt hierbei die Generatorleistung deutlich höher als beim Klauenpolgenerator. [103] Der Spitzenwirkungsgrad des ISG liegt im unteren Drehzahlbereich mit 94 % sehr hoch und fällt mit der Drehzahl auf ca. 70 % ab. Zum Vergleich erreichen wassergekühlte Klauenpolgeneratoren über den ganzen Drehzahlbereich einen Wirkungsgrad von maximal 70 %. Da die größte Häufigkeit der Betriebspunkte im niedrigen Motordrehzahlbereich liegt, ermöglicht der ISG im Vergleich zum Klauenpolgenerator einen deutlich effizienteren Betrieb.

4.2.1.3 Auxiliary Power Unit

Die Auxiliary Power Unit (APU) dient zur motorunabhängigen Stromversorgung von Kraftfahrzeugen. Dabei wird aus dem fossilen Treibstoff wie Benzin oder Diesel mittels einer katalytischen Kraftstoffreformierung und einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle (Solid-Oxide-Fuel-Cell (SOFC)) elektrische Energie erzeugt. Andere Entwicklungen zeigen den Einsatz von Niedertemperatur-Brennstoffzellen wie die PEM (Proton Exchange Membrane). [15]

Durch derartige APU-Konzepte kann die Verfügbarkeit von elektrischer Energie bei Motorstillstand für Komfortfunktionen wie z. B. die Standklimatisierung sichergestellt sowie die uneingeschränkte Startfähigkeit des Verbrennungsmotors bei tiefen Temperaturen gewährleistet werden. Der Leistungsbereich der APU reicht dabei bis zu 5 kW.

4.2.2 Energieumsetzer

Als elektrische Energieumsetzer werden in Kraftfahrzeugen DC/DC-Wandler eingesetzt. Diese haben die Aufgabe, die Spannungen zwischen Traktions- und Bordnetz in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben umzusetzen und die Energieflussrichtung zu bestimmen. Die Energieflussrichtung wird hier vorwiegend bidirektional ausgelegt sein, wodurch eine Starthilfe von konventionell angetriebenen Fahrzeugen ermöglicht wird. Der Aufbau eines DC/DC-Wandlers lässt sich dabei auf die folgenden drei Grundformen zurückführen:

- Abwärtswandler
- Aufwärtswandler
- Invertierender Wandler

4.2.2.1 Funktion

Die Funktion der Gleichspannungsumsetzung kann über einen Linearregler oder getaktet über einen Halbleiterschalter erfolgen. Da die Verlustleistung bei einem Linearregler sehr hoch ist und somit neben dem schlechten Wirkungsgrad auch erhebliche Kühlungsprobleme bei hohen Ausgangsleistungen entstehen, wird für den DC/DC-Wandler im Fahrzeug der getaktete Betrieb vorgezogen.

Die Halbleiter eines DC/DC-Wandlers schalten in der Regel während des Betriebs abwechselnd zwischen dem leitenden und sperrenden Zustand. Man spricht dabei von weichschaltenden Umsetzern, wenn das Umschalten beim Nulldurchgang des

Stromflusses erfolgt, und von hartschaltenden Umsetzern, wenn der Übergang zwischen den Schaltzuständen zu einem beliebigen Zeitpunkt stattfinden kann.

Bei hohen Spannungsdifferenzen zwischen Eingangs- und Ausgangsseite, hoher Leistungsübertragung oder Potenzialtrennung werden zusätzlich Transformatoren verbaut. Der Strom wird dabei auf der Primärseite mit einer Frequenz größer 20 kHz getaktet. Hierfür werden HF-Transformatoren eingesetzt, die ein geringeres Gewicht und ein kleineres Bauvolumen als herkömmliche Netztransformatoren haben.

4.2.3 Energiespeicher

Als Energiespeicher im 14 V Bordnetz werden heutzutage Bleisäurebatterien eingesetzt. Neben der Startfunktion hat die Fahrzeugbatterie die Aufgabe, Energie in kritischen Betriebsphasen des Bordnetzes zu liefern und Leistungsspitzen zu puffern. Bedingt durch umfangreiche Fahrzeugausstattungen und sehr hohe erforderliche Kaltstartleistungen werden wie z. B. im VW Phaeton zwei Batterien verbaut. Aktuelle Batterietechnologien sind hierbei die Nassbatterie, die VRLA (Valve Regulated Lead Acid Battery) - Batterie, die Gel-Batterie und die AGM (Absorbent Glass Mat) - Batterie. Im Weiteren werden die wichtigsten Kenngrößen und das grundlegende Betriebsverhalten der Bordnetzatterie vorgestellt.

4.2.3.1 Batteriekenngößen

Die in Deutschland hergestellten Bordnetzatterien sind nach DIN EN 60 095-1 / A11 durch die Nennspannung, die Nennkapazität, den Kälteprüfstrom und eine 9-stellige Typnummer gekennzeichnet. [12]

Nennkapazität

Die Nennkapazität ist definiert nach DIN EN als die Strommenge in Ah, die einer Batterie bei einer 20 Stunden langen Entladung mit konstantem Strom bis zu einer Entladeschluss-Spannung von 1,75 V/Zelle entnommen werden kann. Sie wird vorwiegend durch die verwendeten Mengen aktiven Materials an Säure, Plusmasse und Minusmasse bestimmt.

Kälteprüfstrom

Der Kälteprüfstrom kennzeichnet das Kurzzeitentladeverhalten der Batterie bzw. die Stromabgabefähigkeit bei Kälte. Dieser ist abhängig vom Innenwiderstand der Batterie, der bei Abnahme von Temperatur und Ladezustand zunimmt. Nach DIN EN

muss die Klemmenspannung bei Entladung mit dem Kälteprüfstrom und einer Temperatur von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 s nach Beginn der Entladung mindestens $1,25\text{ V/Zelle}$ betragen.

4.2.3.2 Betriebsverhalten

Bleisäurebatterien bestehen aus einer positiven Elektrode mit Bleidioxid und einer negativen Elektrode mit Blei als aktivem Material. Als Elektrolyt wird verdünnte Schwefelsäure eingesetzt. Die Freisetzung des Elektrolyten bei der Aufladung und sein Verbrauch bei der Entladung sind ein wesentlicher Unterschied zu den NiMH-Systemen, bei denen der Elektrolyt nur der Ionenleitung dient. Hieraus resultiert ein anderes Betriebs- und Alterungsverhalten.

Nach dem Beginn der Entladung sinkt die Batteriespannung stromabhängig auf einen Wert, der bei Fortsetzung der Entladung mit einem konstanten Strom nur noch relativ langsam bis zum Entladeschluss abnimmt. Beim Entladeschluss bricht die Spannung zusammen, weil die energieliefernden aktiven Substanzen nahezu vollständig umgesetzt sind. Die verfügbare Ladung ist abhängig vom Entladestrom, d.h. wird die Batterie mit einem kleineren als dem Nennstrom entladen, kann mehr als die Nennkapazität entnommen werden. Das Laden von Batterien kann entweder mit konstanter Spannung oder mit konstantem Strom erfolgen. Im Bordnetz wird die Batterie mit einer im Generatorregler implementierten Spannungsbegrenzung, die abhängig von der Gasungsspannung der Batterie ist, geladen. Folglich nimmt der Ladestrom bei Erreichen der Spannungsgrenze ab, wodurch eine schädliche Überladung vermieden wird.

Das oben beschriebene Betriebsverhalten kann durch Alterungsprozesse innerhalb der Batterie beeinflusst werden. Die Säureschichtung und die Sulfatierung sind unter anderem zwei chemische Vorgänge, die den Alterungsprozess vorantreiben.

Säureschichtung

Bei der Säureschichtung treten aufgrund der Funktion des Elektrolyten als aktivem Bestandteil der Elektrodenreaktion Dichteunterschiede auf, die dazu führen, dass die Säuredichte im oberen Bereich der Zelle ab- und im unteren Bereich zunimmt. Die hiermit verbundene Potenzialdifferenz führt zu einer Entladung des unteren Teils der Elektroden, was irreversible Alterungseffekte zur Folge haben kann.

Sulfatierung

Bei der Entladung der Elektroden kommt es zur Bildung von Sulfatkristallen. Die Sulfatkristalle wachsen an, falls nach der Entladung die Batterie nicht kurzfristig wieder

aufgeladen wird. Das Entstehen großer Sulfatkristalle hat zur Folge, dass beim nächsten Ladevorgang die Rückwandlung erschwert wird und somit Sulfatkristalle bei einer Vollladung zurückbleiben. Während der Betriebszeit können sich diese Kristalle aufsummieren, woraus eine Reduktion der aktiven Masse und damit der verfügbaren Kapazität folgt. Weiterhin verringert sich die Batteriespannung während der Entladung. Als weitere das Betriebsverhalten beeinflussende Alterungsprozesse seien hier die Korrosion, Abschlämmung, Umkehrladung und Eisbildung genannt.

4.2.4 Energieverteilung

Die Energieverteilung erfolgt in einer hierarchischen Sternstruktur über Kupferleitungen mit leitungsbezogener Absicherung. Die Kupferleiterquerschnitte werden unter Berücksichtigung des zulässigen Spannungsabfalls und der Erwärmung dimensioniert. [12] Der zulässige Spannungsabfall ist hierbei abhängig von der zu versorgenden Komponente und deren Betriebsspannungsbereich. Die Erwärmung spielt gerade bei der Verlegung im Kabelbaum eine wichtige Rolle, weil dadurch die Stromtragfähigkeit erheblich eingeschränkt werden kann.

Die am elektrischen Energienetz angeschlossenen Verbraucher werden mit Schmelzsicherungen bzw. bei elektronischer Ansteuerung mit einem Halbleiterschalter abgesichert. Hierbei liegt der Nennwert der Schmelzsicherungen um 25 % höher als der maximale Dauerstrom des Verbrauchers. Die Zeitdauer möglicher Spitzenströme beispielsweise durch das Einschalten von Elektromotoren muss deutlich unterhalb der Auslösekennlinie der Sicherung liegen, um frühzeitige Auslösung oder mögliche Alterung zu vermeiden. Bei elektronisch abgesicherten Leitungen sind definierte Strombegrenzungen, Auslösekennlinien und Kurzschlusserkennung möglich, wodurch die Sicherungsnennwerte den maximalen Dauerströmen angenähert werden können.

4.3 Untersuchung und Bewertung der elektrischen Bordnetzleistung

Für die Analyse der elektrischen Leistung im 14 V Bordnetz wurden verschiedene Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Antriebsarten und Ausstattungsgraden herangezogen. Dabei wurde untersucht, welche Auswirkungen damit auf die installierte Bordnetzleistung verbunden sind. Weiterhin wurde die elektrische Bordnetzleistung in bestimmten Betriebsphasen des Fahrzeugs ermittelt. Im Fokus stand hier, einerseits die im Bordnetz verbauten Komponenten zu vermessen und andererseits die Einflüsse auf das Betriebsverhalten der Komponenten und deren Auswirkungen

auf die elektrische Bordnetzleistung zu analysieren. Hierfür war die Ausrüstung der Fahrzeuge mit entsprechender Messtechnik notwendig. Als Messfahrzeuge standen sowohl ein Kleinwagen, ein Mittel- und Oberklassefahrzeug mit jeweils konventionellem Antrieb als auch ein Elektrofahrzeug auf Basis einer Mittelklasseplattform zur Verfügung.

4.3.1 Installierte elektrische Leistung

Die Aktoren wurden bei dieser Untersuchung hinsichtlich ihrer Stromaufnahme in folgende Leistungsklassen aufgeteilt [46]:

- Leistungsklasse A: $< 1 \text{ A}$
- Leistungsklasse B: $1 \text{ A} \leq \dots < 5 \text{ A}$
- Leistungsklasse C: $5 \text{ A} \leq \dots < 20 \text{ A}$
- Leistungsklasse D: $\geq 20 \text{ A}$

Weiterhin wurden die Komponenten den Funktionsbereichen Antrieb, Sicherheit, Komfort und Infotainment zugeordnet. Die antriebsbezogenen Komponenten sind dabei unter anderem verantwortlich für die Kinematik des Fahrzeugs, die Erhöhung der Komponentenlebensdauer im Antriebsstrang (z. B. Kühlerlüfter) und die Energieversorgung. Die Komponenten der Kategorie Sicherheit dienen der sicheren Verkehrsführung des Fahrzeugs. Die Komfortkomponenten bieten den Fahrzeuginsassen eine wahrnehmbare Erhöhung der Bequemlichkeit beim Autofahren und sind somit für einen sicheren Fahrzeugbetrieb nicht erforderlich. Die Komponenten der Kategorie Infotainment sorgen für die Bereitstellung aktueller Verkehrsinformationen und Navigationshilfen bis hin zur Unterhaltung. Tabelle 4.2 zeigt hier zur Veranschaulichung eine Matrix aus den Leistungsklassen und Funktionsbereichen, die eine Auswahl der verbauten Bordnetzkomponenten eines Mittelklassefahrzeugs mit konventionellem Antrieb beinhaltet.

Die Einträge dieser Matrix können sich in Abhängigkeit von dem Fahrzeugtyp, der Antriebsart und dem Ausstattungsgrad ändern, d.h. es können Systeme wegfallen oder neu hinzukommen. Außerdem kann sich auch die Leistungsaufnahme bestehender Komponenten bzw. Systeme aufgrund einer anderen Dimensionierung ändern.

Diese Abhängigkeiten sollen in den beiden folgenden Kapiteln näher untersucht werden. Um die Auswirkungen der Antriebsarten und der Ausstattungsgrade auf die installierte Leistung besser darstellen zu können, wurde die installierte Leistung separat einerseits für den Funktionsbereich Antrieb und andererseits für die Funktionsbereiche Sicherheit, Komfort und Infotainment betrachtet. Die Leistungsklasse A

wurde aufgrund ihres sehr geringen Anteils an der gesamten installierten Leistung in den beiden folgenden Kapiteln nicht berücksichtigt.

	Leistungs- klasse A ($I < 1 \text{ A}$)	Leistungs- klasse B ($I < 5 \text{ A}$)	Leistungs- klasse C ($I < 20 \text{ A}$)	Leistungs- klasse D ($I \geq 20 \text{ A}$)
Antrieb	Stellglieder, Ansteuer- ungseinhei- ten, Steuergeräte	—	Kraftstoffsyst- em, Einspritz- und Zündsystem	Abgasnachbe- handlung, Kühlsysteme, Lenkung, Starter
Sicherheit	—	Stand-, Brems-, Nebelschluss- licht, Außenspiegel- heizung	Abblend-, Fernlicht, Scheibenreini- gungsanlage, Signalhorn	Bremssystem
Komfort	—	Innenraum- licht, Außenspiegel- verstellung	Sitzheizung, Zigarettenan- zünder, Fensterheber, Zentralverrie- gelung	Innenraumge- bläse
Info	—	Navigations- system, Radio	—	—

Tabelle 4.2: Einteilung der Komponenten in Abhängigkeit von der Leistung und der Funktion

4.3.1.1 Funktionsbereich Antrieb

Die installierte Leistung im Funktionsbereich Antrieb ist für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben, wie das Balkendiagramm in Abbildung 4.10 zeigt, einerseits abhängig vom Verbrennungsverfahren und andererseits von der Motorleistung und dem Hubraum. Ein Fahrzeug mit größerem Ottomotor führt zu einer Erhöhung der installierten Bordnetzleistung. Dies ist darin begründet, dass das Drehmoment

und die erforderliche Startdrehzahl des Verbrennungsmotors unter anderem von Motortyp, Hubraum, Zylinderzahl, Kompression, Lagerreibung, Zusatzlasten, Gemischaufbereitung, Motoröl und Temperatur abhängen. [36] Hieraus resultiert, dass beispielsweise für einen 2,0 l Ottomotor eine elektrische Starterleistung von 1,4 kW und für einen 1,6 l Ottomotor nur 1,0 kW notwendig sind.

Die im Funktionsbereich Antrieb installierte Leistung eines Fahrzeugs mit Dieselmotor ist höher als mit einem Ottomotor, obwohl ein Sekundärluftsystem zur Abgasnachbehandlung beim Dieselmotor nicht verbaut ist. Die Sekundärluftpumpe bläst nach dem Start bis zu 3 min Zusatzluft in das Abgasrohr zum Nachverbrennen des Abgases und nimmt hierbei eine Leistung von ca. 500 W auf.

Dagegen werden bei Dieselfahrzeuge aufgrund ihres schlechten Kaltstartverhaltens eine höhere Starterleistung und Glühstiftkerzen als Starthilfe benötigt. Das schlechte Kaltstartverhalten ist darin begründet, dass im Vergleich zum Ottomotor sowohl das Reibmoment stärker zunimmt als auch beim Verdichten der Luft unter anderem der Kompressionsdruck durch Leck- und Wärmeverluste abnimmt. Die Glühstiftkerzen sind daher in einem Bereich des Brennraums angeordnet und müssen innerhalb kurzer Zeit eine Betriebstemperatur von ca. 850 °C für den Start erreichen. Eine Glühstiftkerze nimmt dabei eine Leistung von ungefähr 100 W auf. Um den Hochlauf des Verbrennungsmotors zu optimieren und die Blaurauch-Emissionen und die Verbrennungsgeräusche zu reduzieren, werden die Glühstiftkerzen nach dem Start des Verbrennungsmotors bis zu 180 s betrieben. [12]

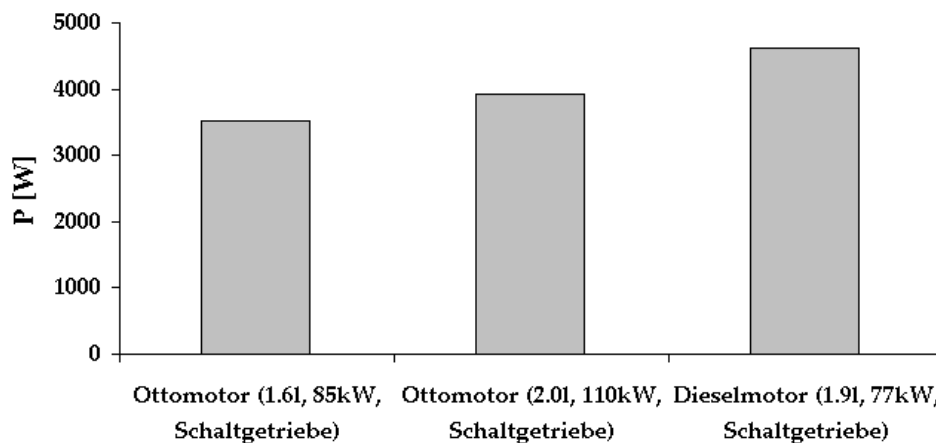


Abbildung 4.10: Installierte Leistung im Funktionsbereich Antrieb in Abhängigkeit von der Motorisierung konventioneller Antriebe

Eine weitere Zunahme der installierten Leistung kann durch hohe Verbrennungsmotorleistungen und die damit in der Regel verbundene Höherdimensionierung des

Kühlsystems erfolgen. Die installierte Leistung des Kühlerlüfters kann dabei bis zu 1,2 kW betragen.

Des Weiteren kann es zu Änderungen der installierten Leistung durch den Einsatz eines Automatikgetriebes kommen, weil hierfür im Gegensatz zum Schaltgetriebe ein elektromechanischer oder elektrohydraulischer Aktor verbaut wird. Dieser Aktor realisiert das Betätigen der Trockenkupplung und das Einlegen der Gänge. Bei der elektrohydraulischen Lösung ist neben den Ventilen eine Hydraulikpumpe inklusive Druckspeicher erforderlich. Die Pumpenleistung beträgt ca. 250 W zur Aufrechterhaltung des Druckniveaus. Für die elektromechanische Umsetzung sind 3 Aktoren mit je 100 W installierter Leistung notwendig. Bei sogenannten Sport Utility Vehicles (SUV) wie dem VW Touareg oder Porsche Cayenne werden Verteilergetriebe zusammen mit Differenzialsperren eingesetzt. Die Kraftverteilung wird zwischen den Antriebsrädern und zwischen Vorder- und Hinterachse elektromechanisch geregelt. Die Leistungsaufnahme liegt hierfür bei 300 W.

Vergleicht man die in Abbildung 4.11 dargestellten installierten Leistungen zwischen konventionell und alternativ angetriebenen Fahrzeugen, so ist bei diesen untersuchten Fahrzeugen ein deutlicher Unterschied festzustellen. Die installierten Leistungen bei dem Elektrofahrzeug und Brennstoffzellenfahrzeug sind 1,5 kW bzw. 1,1 kW geringer als beim Fahrzeug mit Ottomotor. Die für den Verbrennungsmotor notwendigen Systeme wie die Kraftstoffförderung, das Einspritz- und Zündsystem, die Startanlage und die Abgasnachbehandlung entfallen bei einem rein elektrisch angetriebenen Fahrzeug. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor sind aber bei Elektroantriebe weitere Kühlsysteme wie Kühlmittelpumpen und Kühlerlüfter für den Elektromotor, die Traktionsbatterie und die Leistungselektronik notwendig. Die installierte Leistung für diese zusätzlichen Kühlsysteme liegt in diesem untersuchten Elektrofahrzeug bei ca. 200 W.

Die installierte Leistung des Brennstoffzellenfahrzeugs liegt im Vergleich zu dem Elektrofahrzeug höher, weil die erforderliche zusätzliche Kühlleistung aufgrund der starken thermischen Entwicklung im Brennstoffzellen-Stack sogar bei 450 W liegt. Hinzu kommt, dass für den Brennstoffzellen-Stack außerdem noch ein Einspritzsystem mit einer Leistung von ca. 150 W verbaut ist.

4.3.1.2 Funktionsbereiche Sicherheit, Komfort und Infotainment

Die Auswirkungen des Ausstattungsgrades machen sich in den Funktionsbereichen Sicherheit, Komfort und Infotainment besonders bemerkbar. Dabei kann die installierte Leistung in einem Kleinwagen mit Serienausstattung in diesen Funktionsbereichen um ca. 1,2 kW geringer als in einem Oberklassefahrzeug sein. Der Grund hierfür ist, dass die Automobilhersteller den Markt mit einer breiten Produktpalette

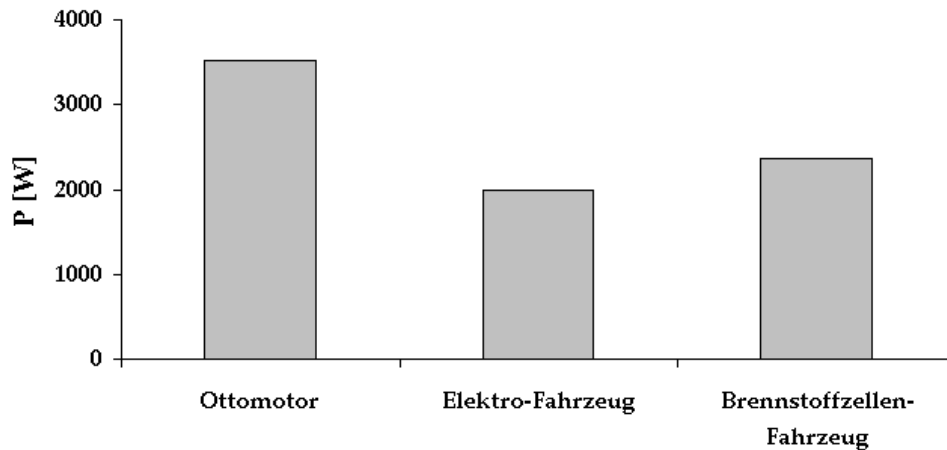


Abbildung 4.11: Installierte Leistung im Funktionsbereich Antrieb in Abhängigkeit von verschiedenen Antriebskonzepten

abdecken. Diese beginnt mit Kleinwagen, die unter anderem durch eine minimale Serienausstattung einen geringen Einstiegspreis für den Kunden ermöglichen. Mit einer gehobenen Ausstattung kann das Niveau der installierten Leistung der nächsthöheren Fahrzeugklasse erreicht bzw. in bestimmten Konfigurationen sogar übertroffen werden.

Fahrzeuge der Oberklasse haben einen sehr hohen Serienausstattungsgrad. Dieser liegt bei diesem untersuchten Fahrzeug bei ungefähr 3 kW. Eine optional höhere Ausstattung kann, wie in Abbildung 4.12 deutlich wird, auf ca. 4,3 kW oder mehr steigen. Bei Fahrzeugen der oberen Mittelklasse und der Oberklasse werden optional Komponenten verbaut, die in den unteren Klassen aus dem oben genannten Grund nicht eingesetzt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Sitzklimatisierung, Lenkradheizung, Sitzheizungen für die Rückbank und die Frontscheibenheizung. Derartige Heizsysteme machen dabei den größten Anteil an der installierten Leistung bei optionalen Ausstattungen in oberen Fahrzeugklassen aus.

4.3.1.3 Fazit

Die Analyse der im Bordnetz installierten elektrischen Leistung zeigt deren Abhängigkeit von der Motorisierung, dem Antriebskonzept und den Ausstattungsvarianten in den Funktionsbereichen Sicherheit, Komfort und Infotainment. Mit einer Vielzahl an Fahrzeugmodellen und den vom Hersteller angebotenen möglichen Ausstattungskonfigurationen ist daher eine hohe Variation an Bordnetzleistungsprofilen verbunden und somit individuelle Auslegungen der Energieversorgung erforderlich.

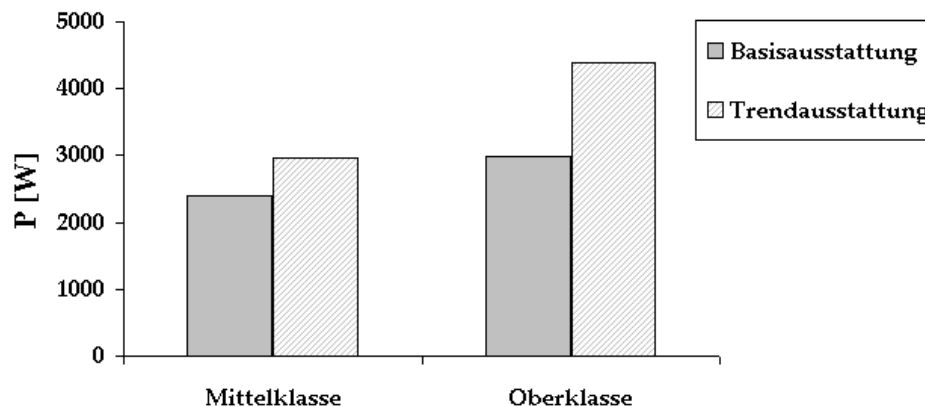


Abbildung 4.12: Installierte Leistung in den Funktionsbereichen Sicherheit, Komfort und Infotainment in Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad

Für eine korrekte Dimensionierung der Energieversorgung ist die Kenntnis der installierten Leistung allein nicht ausreichend, weil diese keine Aussage über das Betriebsverhalten bzw. der Betriebsdauern der Komponenten in verschiedenen Fahrzeugzuständen ermöglichen. Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln die Betriebsphasen des Bordnetzes und die Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten der Komponenten untersucht und bewertet.

4.3.2 Betriebsphasen

Ein Kraftfahrzeug kann in die vier Betriebsphasen Ruhezustand, Vor-, Nachlauf- und Fahrbetrieb eingeteilt werden. Der Vorlaufbetrieb ist die Aktivierung aller Komponenten im Bordnetz ausgehend vom Ruhezustand bis zum Motorlauf. Er beginnt mit dem Aufschließen des Fahrzeugs. Nach dem Starten des Fahrzeugs ist der Vorlaufbetrieb beendet und der Fahrbetrieb hat begonnen. Der Nachlaufbetrieb startet nach der Ausschaltung der Klemme 15¹. Nach dem Nachlaufbetrieb setzt der Ruhezustand im Fahrzeugbordnetz ein. Abbildung 4.13 zeigt exemplarisch, welche Komponenten bzw. Systeme diesen Betriebsphasen zugeordnet werden können.

4.3.2.1 Messaufbau für die Bordnetzvermessung

Zur Messung und Auswertung der 14 V Bordnetzleistung der zu untersuchenden Fahrzeuge in den verschiedenen Betriebsphasen wurde ein mobiles Datenerfassungssystem der Firma RD Electronic eingesetzt. Die Messgrößen waren der Genera-

¹Klemmenbezeichnung in der Kfz-Elektronik für den Zündungsplus

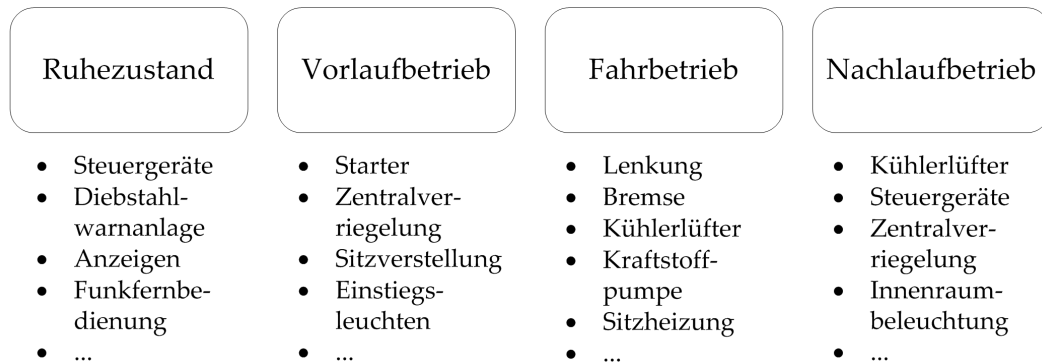


Abbildung 4.13: Betriebsphasen eines Fahrzeugs

torstrom bei Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb und der bordnetzseitige Strom des DC/DC-Wandlers in Fahrzeugen mit alternativem Antrieb. Des Weiteren wurden die Batteriespannung und der Batteriestrom messtechnisch erfasst. Die Stromaufnahme der Komponenten der Leistungsklasse D wie der Kühlerlüfter, die Lenkung, das Bremssystem und der Starter wurden zusätzlich separat vermessen, um deren Verhalten in den Betriebsphasen besser beurteilen zu können. Die Leistungsaufnahme der vom Fahrer schaltbaren Komponenten der Funktionsbereiche Sicherheit, Komfort und Infotainment wurde ebenfalls messtechnisch ermittelt. Dabei wurde zuerst die Klemme 15 geschaltet und anschließend jede zu untersuchende Komponente nacheinander aktiviert und deaktiviert. Die Differenz des Bordnetzstromes bei aktivierten und deaktivierten Zustand ergibt dabei die Stromaufnahme der Komponente.

Abbildung 4.14 zeigt die Bestandteile des Messaufbaus im Fahrzeug. Der Strom wurde dabei indirekt über Strommesszangen der Firma LEM erfasst. Für die Messung des Ruhestroms wurden 1 Ω Messshunts mit einer Toleranz von 0,5 % verbaut. Ein Messshunt wurde in Reihe zwischen dem Batterie-Pluspol und dem Absicherungsmodul auf der Batterie eingesetzt, um den gesamten Ruhestrom zu messen. Weitere Messshunts wurden zur Identifizierung der Komponenten, die den größten Anteil am Ruhestrom haben, auf der Sicherungsplatine der Hauptstromversorgung und im Sicherungskasten im Fahrgastraum eingesetzt. Außerdem wurden CAN-Nachrichten wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Bremspedalbetätigung, Bremsdruck und Lenkradwinkel mit der CANalyzer Software der Firma Vector protokolliert.

Datenerfassungssystem TDS 1590A

Das TDS 1590A der Firma RD Electronic GmbH ist ein Messsystem zur Erfassung und Speicherung von verschiedenen physikalischen Größen. Es setzt sich aus einem

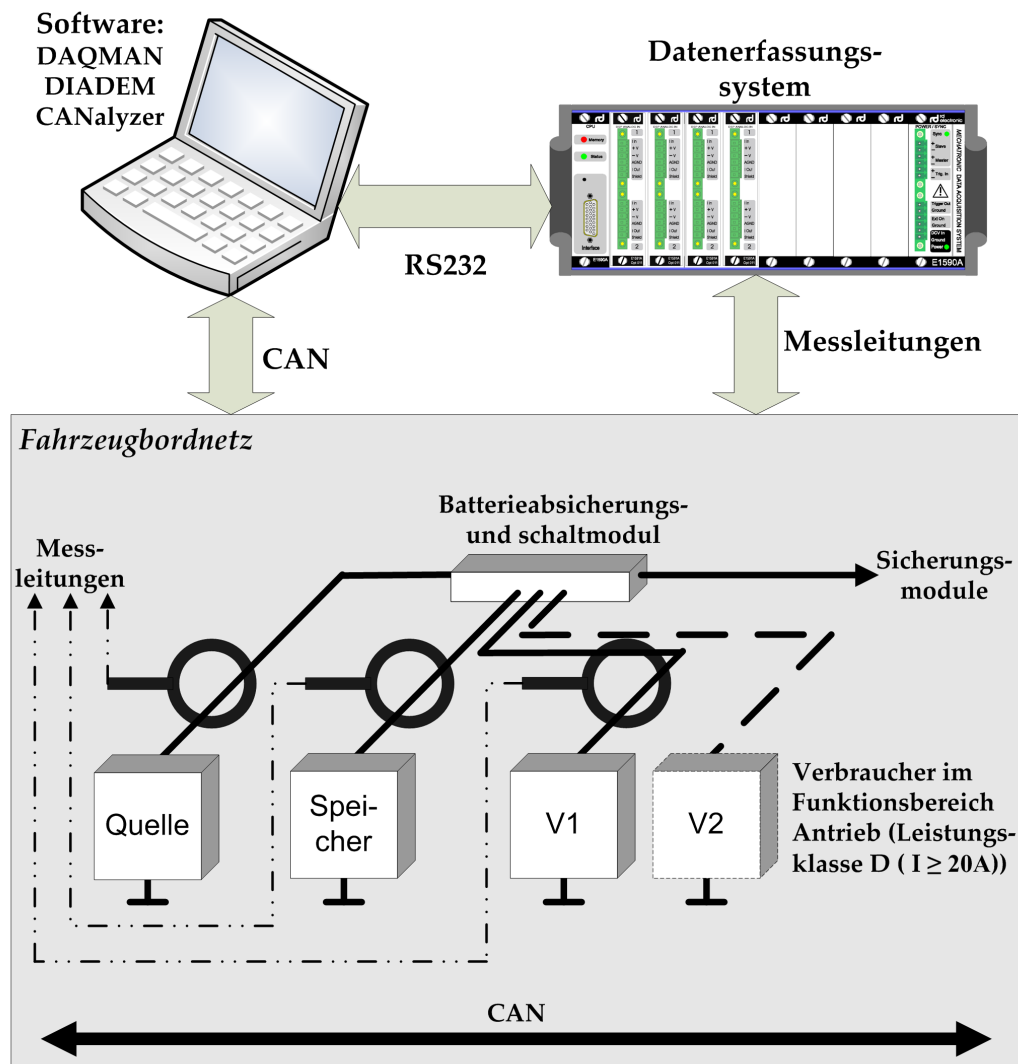


Abbildung 4.14: Messaufbau für die Vermessung der Bordnetzleistung im Fahrzeug

Basissystem und optionalen Einsteckkarten für unterschiedliche Anwendungen zusammen. Alle Einsteckkarten verfügen über eine autarke Recheneinheit, so dass das Gerät auf die gewünschte Leistungsfähigkeit skaliert werden kann. Die Messkanäle werden alle parallel abgetastet. Die Kanaleinstellungen und die aufgenommenen Messwerte sind in einem internen Speicher durch eine Lithium-Batterie gepuffert.

Für die Strom- und Spannungsmessung im Bordnetz wurde die Multi-Sensor-Einsteckkarte TDS E1591A Opt 011 eingesetzt, mit der auch Temperatur- und Widerstandsmessungen möglich sind. Dieses Modul hat zwei unabhängige, galvanisch getrennte Eingänge und für jeden Eingang eine programmierbare Signalaufbereitung. Darüber hinaus sind die Messbereiche in vielen Stufen programmierbar. Tabelle 4.3 zeigt die technischen Daten des Multi-Sensormoduls. Um in den Messbe-

reichen das Rauschen unterdrücken zu können, kann der Eingangsfilter von 1 Hz bis 1 kHz eingestellt werden. Das Modul kann neben dem Ablegen von Stützstellen Mittelwerte, Maximum- und Minimumwerte im Bereich von 100 ms und 10 h zur Online-Datenreduktion liefern.

Kanäle	Anzahl:	2
	Auflösung:	12 bit bzw. 16 bit
	Abtastrate:	25 kS/s bzw. 50 kS/s
Spannungsmessung	Maximalspannung:	$\leq \pm 50 \text{ V (peak)}; \leq 30 \text{ V (rms)}$
Gleichtakt- unterdrückung	Bereich $\leq 0,5 \text{ V}$:	$< 60 \text{ dB}$
	Bereich $> 0,5 \text{ V}$:	$< 70 \text{ dB}$
	Eingangsimpedanz:	1 M Ω , 60 pF
	Messbereich:	$\pm 10 \text{ mV} \dots \pm 50 \text{ V}$
Genauigkeit	Bereich $\leq 50 \text{ mV}$:	$\leq \pm 0,3 \% \text{ vom Messbereich}$
	Bereich $> 50 \text{ mV}$:	$\leq \pm 0,2 \% \text{ vom Messbereich}$
	Rauschen:	20 μV_{pp}
Temperatur	Offset	$\pm 1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Tabelle 4.3: Technische Daten der Multi-Sensor-Einsteckkarte TDS E1591A Opt 011

Data Aquisition Manager

Zum Messsystem gehört die Bediensoftware Data Aquisition Manager. Die Software ist eine Microsoft Windows Server/Client - Anwendung, die auf einem Windows XP - PC ausgeführt werden kann. Der Data Aquisition Manager ermöglicht die Systemverwaltung, das Konfigurieren der Messfunktionen und die Online-Datenanzeige. Die Server/Client-Architektur stellt eine DLL zur Verfügung, über die andere Softwarepakete wie z. B. DIAdem (GFS ®) oder DASyLab (Datalog ®) zeitgleich zugreifen können. Weiterhin sind die Messdaten im ASCII-Format speicherbar, so dass sie anderen Anwendungen wie beispielsweise Microsoft Excel übergeben werden können.

Strommesszange PR200

Die Strommesszange PR200 der Firma LEM ist für die Messung von Gleich- und Wechselströmen geeignet. Dabei misst die PR200 unter Verwendung der Halleffekttechnologie Ströme bis zu einem Effektivwert von 200 A. In Tabelle 4.4 sind die dazugehörigen technischen Daten dargestellt.

Genauigkeit	20 A Bereich:	$\leq \pm 1\%$ des gemessenen Wertes
	200 A Bereich:	$\leq \pm 1\%$ des gemessenen Wertes
Auflösung	20 A Bereich:	± 10 mA
	200 A Bereich:	± 100 mA
Ausgangs-empfindlichkeit	20 A Bereich:	10 mV/A
	200 A Bereich:	1 mV/A
Temperaturdrift		$\pm 0,1\%$ des gemessenen Wertes/°C
Ansprechzeit		$< 10 \mu s$

Tabelle 4.4: Technische Daten der Strommesszange PR200 der Firma LEM

4.3.2.2 Fahrbetrieb

Die Messungen im Fahrbetrieb erfolgten unter verschiedenen Umweltbedingungen, um deren Einflüsse auf die elektrische Bordnetzleistung analysieren zu können. Die Umweltbedingungen lassen sich in die in Tabelle 4.5 dargestellten Szenarien unter Berücksichtigung der Strecke, der Außentemperatur und der vom Fahrer aktivierten Bordnetzsysteme zusammenfassen. Die Fahrzeit für beide Strecken liegt bei ungefähr einer halben Stunde. Die vom Fahrer aktivierten Systeme sind heuristische auf der Außentemperatur basierenden Annahmen. Diese Szenarien wurden alle mit einem Elektrofahrzeug und zum Teil mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen durchgeführt.

Umwelteinflüsse

Die mittleren Bordnetzleistungen des Elektrofahrzeugs für die einzelnen Szenarien sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen von Außentemperatur und Strecke auf die Bordnetzleistung sind diese separat aufgeführt. Hieraus wird einerseits die Leistungsdifferenz von bis zu 13 W zwischen 7 °C und 26 °C Außentemperatur und andererseits die Zunahme von ungefähr 20 W bis 30 W bei der Überlandfahrt im Vergleich zur Stadtfahrt ersichtlich.

Die Ursache für die Zunahme der mittleren Bordnetzleistung bei 7 °C liegt darin, dass in diesem Temperaturbereich sowohl das Kühlsystem im Funktionsbereich Antrieb als auch die Heizsysteme in den Funktionsbereichen Sicherheit und Komfort aktiv sind. Bei 7 °C Außentemperatur sind bei den Heizsystemen die Sitzheizungen, die in Abhängigkeit von der eingestellten Sitztemperatur über Zweipunkt-Regler geregelt werden, und die Heckscheibenheizung, die bei dieser Außentemperatur durch das Bordnetzsteuergerät zeitverzögert ausgeschaltet wird, aktiviert. Bei 26 °C erhöht sich die Betriebsdauer der Kühlsysteme. Die Heizsysteme sind dagegen deaktiviert.

Szenario	Strecke	Temperatur	Vom Fahrer aktivierte Systeme
1	Stadtfahrt	7 °C	Abblendlicht, Innenraumgebläse, Radio, Sitzheizung, Nebelscheinwerfer, Heckscheibenhei- zung
2	Stadtfahrt	26 °C	Abblendlicht, Innenraumgebläse, Radio
3	Überlandfahrt	7 °C	siehe Szenario 1
4	Überlandfahrt	26 °C	siehe Szenario 2

Tabelle 4.5: Betriebsszenarien bei den Messfahrten

	Überlandfahrt	Stadtfahrt
T = 26 °C	688 W	661 W
T = 7 °C	697 W	674 W

Tabelle 4.6: Mittlere Bordnetzleistungen des Elektrofahrzeugs

Die höhere mittlere Leistung bei der Überlandfahrt im Vergleich zur Stadtfahrt resultierte aus der auf dieser Strecke häufigeren Aktivierung des Brems- und Blinklichtes. Aufgrund verkehrsbedingter Situationen auf einer Strecke wie z. B. Haltephasen an Ampeln oder Kreuzungen führen diese gerade beim Bremslicht zum Teil zu stochastischen Aktivierungen. Die ebenfalls vom Streckenprofil und der Verkehrssituation abhängigen Bremse und Lenkung, auf die im weiteren Verlauf des Kapitels noch näher eingegangen wird, hat auf diesen Strecken zu keinen signifikanten Unterschieden in der mittleren Leistungsaufnahme geführt. Diese Messfahrten haben gezeigt, dass das Betriebsverhalten der Bordnetzkomponenten einerseits durch die klimatischen Außenbedingungen und die strecken- bzw. verkehrsbedingten Situationen und andererseits durch die Komforteinstellungen des Fahrers bzw. der Fahrzeuginsassen bestimmt werden. Unter gewissen Umweltbedingungen kann es somit zu gleichzeitigen Aktivierungen von Komponenten bzw. Systemen im Bordnetz kommen, die zu einem „worst case“ hinsichtlich des Leistungsbedarfs im Bordnetz führen. Diese generellen Einflüsse auf das Betriebsverhalten der Bordnetzkomponenten konnten auch bei den Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb bestätigt werden. Diese Ein-

flüsse werden noch deutlicher erkennbar, wenn der Ausstattungsgrad hinsichtlich der Heizsysteme höher ist.

Im Folgenden soll untersucht werden, welche möglichen Auswirkungen die in Abschnitt 4.3.1.1 gezeigten unterschiedlich verbauten Komponenten im Funktionsbereich Antrieb bei konventionell und alternativ angetriebenen Fahrzeugen auf die mittlere Bordnetzleistung während des Fahrbetriebs hervorrufen.

Vergleich konventioneller und alternativer Antriebskonzepte

Vergleicht man die mittlere Bordnetzleistung zwischen dem Elektrofahrzeug und einem vergleichbaren Fahrzeug mit konventionellem Antrieb, so stellt man beispielsweise für das Szenario 2 fest, dass das Serienfahrzeug mit 647 W einen etwas niedrigeren Leistungsbedarf als das Elektrofahrzeug während des Fahrbetriebs hat. Dies war nach der Analyse in Abschnitt 4.3.1.1 aufgrund der um ca. 1,5 kW niedrigeren installierten Leistung in dem Elektrofahrzeug nicht zu erwarten. Wie schon in Abschnitt 4.3.1.3 angemerkt, kann mit der installierten Leistung keine Aussage über Betriebsverhalten bzw. -dauer der Komponenten getroffen werden. Der Grund für die höhere mittlere Leistung im Elektrofahrzeug ist, dass im Gegensatz zum konventionell angetriebenen Fahrzeug die zusätzlich verbauten Komponenten für das Kühlsystem eine größere Auswirkung auf die mittlere Bordnetzleistung aufgrund ihrer längeren Betriebsdauer haben als die Kurzzeitverbraucher Starter und Sekundärluftpumpe.

Dynamisches Verhalten der Bordnetzleistung

Die während des Fahrbetriebs maximale Leistung kann, wie in Tabelle 4.7 verdeutlicht, bis zu ungefähr 585 W höher liegen als die mittlere Leistung. Die Ursache hierfür ist das dynamische Verhalten der Unterdruckpumpe zur Bremskraftverstärkung und des Stellmotors zur Lenkunterstützung (elektromechanische Lenkung).

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
P_max	1196 W	1239 W	1282 W	1182 W

Tabelle 4.7: Maximale Bordnetzleistungen des Elektrofahrzeugs während des Fahrbetriebs

Unterdruckpumpe zur Bremskraftverstärkung

Der Bremskraftverstärker hat die Funktion, die Betätigungskraft, die zur Erreichung einer gewünschten Bremswirkung des Fahrzeugs benötigt wird, zu reduzieren. Wegen seiner einfachen und kostengünstigen Konstruktion wird hauptsächlich

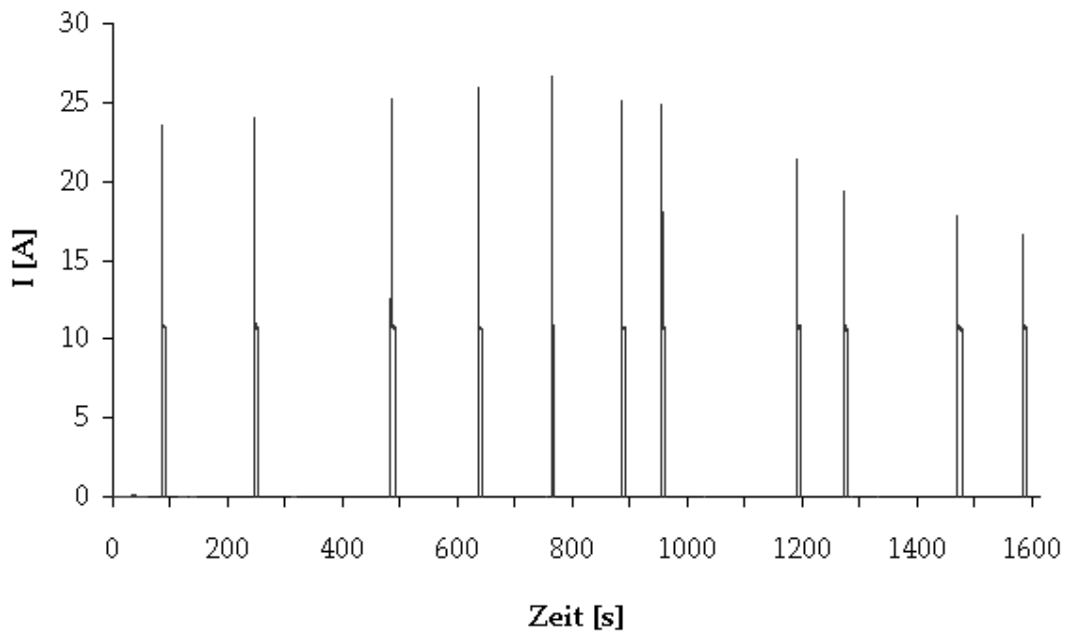


Abbildung 4.15: Stromaufnahme der Unterdruckpumpe bei einer Stadtfahrt

der Unterdruck-Bremskraftverstärker eingesetzt. [12] Hierbei wird in Abhängigkeit der Pedalkraft die pedalseitige Membranfläche mit atmosphärischem Druck beaufschlagt, während auf der anderen Seite Unterdruck herrscht. Die aus der Druckdifferenz resultierende Kraft auf die Membran ergibt einen die Fußkraft unterstützenden Kraftanteil.

In Fahrzeugen mit Ottomotor wird der Unterdruck für den Bremskraftverstärker vorwiegend durch den hinter der Drosselklappe entstehenden Unterdruck im Ansaugrohr des Motors genutzt. Die Höhe des Unterdrucks ist dabei abhängig von der Öffnung der Drosselklappe. Hieraus resultiert der Nachteil, dass bei einigen Antriebskonfigurationen beim Start oder in anderen Lastsituationen zu wenig oder generell gar kein Unterdruck wie bei Dieselfahrzeugen oder rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erzeugt wird. Folglich ist der Einbau einer elektrischen Unterdruckpumpe erforderlich, die in Abhängigkeit der Druckverhältnisse unterstützend eingreift.

Abbildung 4.15 zeigt den Stromverlauf der Unterdruckpumpe während der Stadtfahrt. Auffällig sind die hohen Einschaltströme über 20 A. Dagegen ist die mittlere Leistungsaufnahme für die Stadt- und Überlandfahrt mit 1,56 W bzw. 5,4 W eher gering. Die Leistungsdifferenz macht deutlich, dass das Betriebsverhalten der Unterdruckpumpe sicherlich einerseits durch streckenspezifische Merkmale wie Geschwindigkeits- und Höhenprofile und andererseits durch zufallsbedingte Verkehrssituationen wie fließender oder stockender Verkehr bestimmt wird.

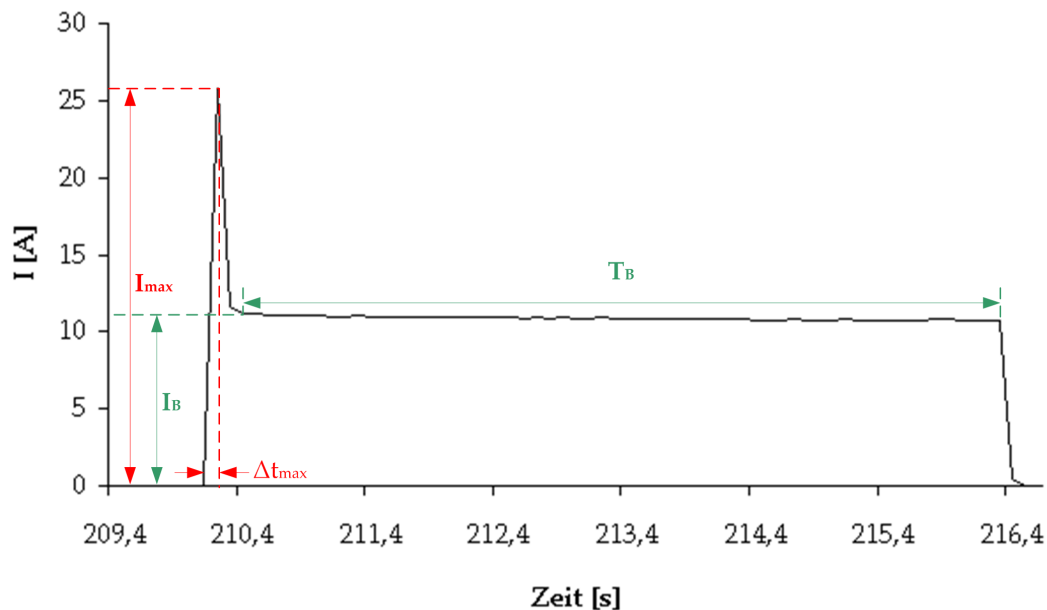


Abbildung 4.16: Stromverhalten der Unterdruckpumpe beim Einschalten

Abbildung 4.16 stellt den mit der Aktivierung verbundenen Stromanstieg der Unterdruckpumpe detaillierter dar. Hier sind beim Einschalten Stromgradienten von 200 A/s möglich. Die Unterdruckpumpe zeigt dabei ein typisches PDT1-Verhalten. Nach dem Einschaltvorgang geht die Stromaufnahme auf ca. 11 A zurück. Die Betriebsdauer T_B der Pumpe richtet sich dabei nach den Druckverhältnissen im Unterdruckbehälter.

Um den Einfluss des Fahrers auf das Betriebsverhalten der Unterdruckpumpe zu untersuchen, wurden vier zusätzliche Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Fahrern durchgeführt. Als Versuchsfahrzeug wurde ein Elektrofahrzeug verwendet, mit dem die Fahrer einen NEDC-Zyklus (Europäischer Normzyklus) auf einem Rollenprüfstand abfahren. Der Grund für die Nutzung des Rollenprüfstandes war, die oben genannten zufallsbedingten Verkehrssituationen auszuschließen und somit vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Als Messgrößen wurden der Strom der Unterdruckpumpe, der Bremslichtschalter, der Bremsdruck im Hauptbremszylinder und die Geschwindigkeit aufgenommen. Tabelle 4.8 zeigt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe.

Die Messergebnisse zeigen die Abhängigkeit des Betriebsverhaltens vom Fahrer und die Auswirkungen auf die mittlere Leistung der Unterdruckpumpe während des Fahrbetriebs. Bei allen Fahrern ist eine annähernd gleiche Häufigkeit bei der Bremspedalbetätigung zu erkennen, was auf das für alle Fahrer gleiche zu Grunde liegende Geschwindigkeitsprofil zurückzuführen ist. Einen deutlichen Unterschied gibt es

	Häufigkeit Bremspedalbe- tätigung	Mittlerer Bremsdruck	Maximaler Strom	Mittlere Leistung
Fahrer 1	31,5 %	4,83 bar	26 A	6,86 W
Fahrer 2	33,0 %	4,28 bar	26 A	5,74 W
Fahrer 3	32,7 %	12,9 bar	25 A	16,8 W
Fahrer 4	29,4 %	4,61 bar	25 A	6,31 W

Tabelle 4.8: Auswirkungen verschiedener Fahrer auf das Betriebsverhalten der Unterdruckpumpe

beim mittleren Bremsdruck des Fahrers 3 gegenüber den anderen Fahrern. Dieser hoher Bremsdruck resultiert aus einer stärkeren Bremspedalbetätigung in den Stillstandphasen des Fahrzeugs, die eine deutlich höhere mittlere Leistung als bei den anderen Fahrern verursacht.

Hydroaggregat für Bremssicherheitssysteme

Das heute für das elektrohydraulische Bremssystem eingesetzte Hydroaggregat ist für die Bremskraftaufteilung verantwortlich und steuert über die Magnetventile den Radzylinderdruck. Hierüber sind unterschiedliche Sicherheitssysteme wie das Antiblockiersystem (ABS), die Antischlupfregelung (ASR) und das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) realisierbar. Um den erforderlichen Bremsdruck von ca. 200 bar in dem geschlossenen hydropneumatischen System aufzubauen, wird ein Gleichstrommotor mit einer Nennleistung von 250 W verbaut. Dieser verursacht beim Anfahren Spitzenströme bis 70 A, die aufgrund möglicher Auswirkungen auf die Bordnetzstabilität bei der Dimensionierung der Energieversorgung mit berücksichtigt werden müssen.

Elektromechanische Lenkung

Nach der europäischen Richtlinie 70/311/EWG muss die Lenkanlage ein einfaches und sicheres Lenken des Fahrzeuges gewährleisten. [12] In vielen Fahrzeugen wird heutzutage neben der elektrohydraulischen die elektromechanische Lenkung eingesetzt. Diese unterstützt die Lenkbewegung des Fahrers mit Hilfe eines Elektromotors, der ein Schneckengetriebe antreibt. Die Schnecke greift in das Zahnrad auf der Lenkwelle, wobei eine Übersetzung von 22:1 stattfindet. Das Steuergerät für die Lenksäulenelektrik berechnet aus den Sensorsignalen „Lenkwinkelposition und Lenkmoment“ das erforderliche Drehmoment des Elektromotors unter Berücksichtigung der

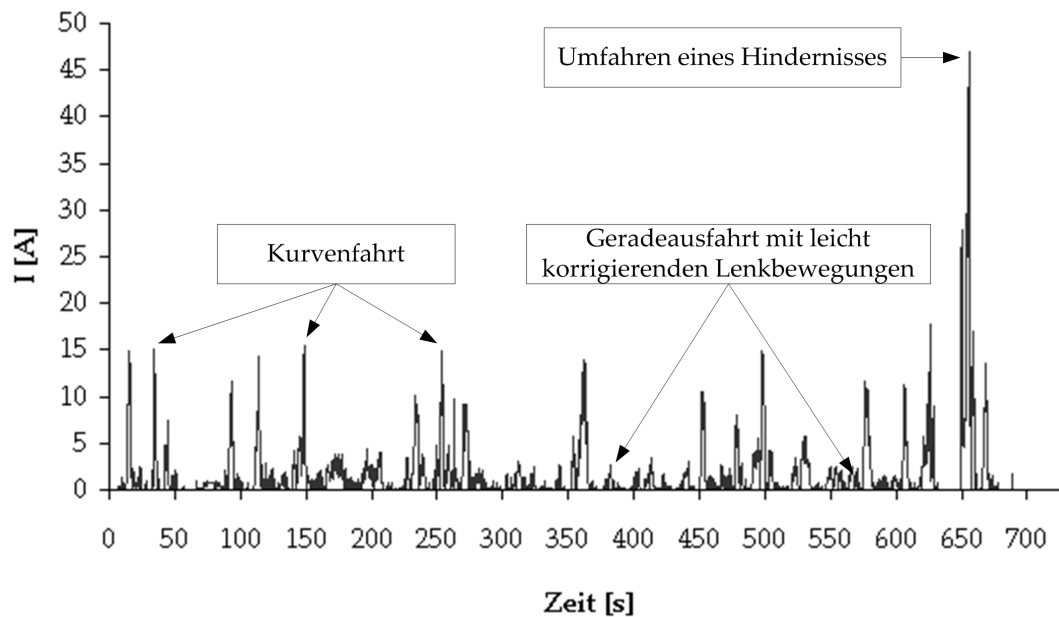


Abbildung 4.17: Stromverhalten der elektromechanischen Lenkung bei einer Stadtfahrt

momentanen Fahrgeschwindigkeit. Abbildung 4.17 stellt das dynamische Leistungsverhalten des Elektromotors während einer Stadtfahrt dar. Hier sind viele Leistungsmaxima während des Fahrbetriebs erkennbar, deren Höhe zwischen 50 W und 275 W aufgrund verschiedener Kurvenfahrten variiert.

Weitaus höhere Leistungsspitzen treten bei Parkmanövern mit bis zu 480 W aufgrund der höheren zu überwindenden Lenkmomente durch die geringere Fahrzeuggeschwindigkeit und durch die sehr hohen Lenkwinkeländerungen auf. Des Weiteren verursachen Radbewegungen gegen ein Hindernis wie z. B. eine Bordsteinkante mit bis zu 1,1 kW die höchsten Leistungsspitzen. Der in Abbildung 4.18 dargestellte Stromverlauf der Lenkung zeigt im Gegensatz zur Unterdruckpumpe deutlich geringere Stromgradienten. Des Weiteren können diese während des Fahrbetriebs schwanken, wobei Stromgradienten von 28 A/s bis zu 130 A/s möglich sind.

Die mittlere Leistungsaufnahmen von ca. 25,2 W für die Stadtfahrt und 24,3 W für die Überlandfahrt zeigen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der gesamten mittleren Bordnetzleistung. Es ist Zufall, dass hier die Lenkprofile der Stadt- und Überlandfahrt eine nahezu identische mittlere Leistung verursachen. Um auch wie beim Bremssystem den Einfluss des Fahrers auf das Betriebsverhalten der Lenkung zu untersuchen, wurden vier Messfahrten mit verschiedenen Fahrern durchgeführt. Hierzu wurde eine Teststrecke ausgewählt, die aus 20 Kurven und einem Umfahren eines Hindernisses bestand. Tabelle 4.9 zeigt die Ergebnisse dieser Messfahrten.

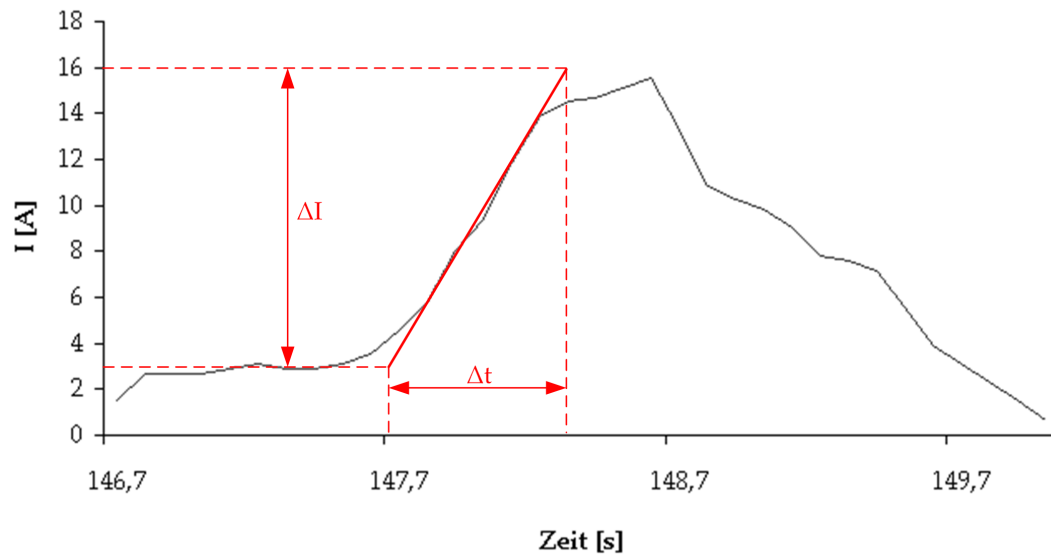


Abbildung 4.18: Stromverhalten der elektromechanischen Lenkung beim Einschalten

	Mittlere Leistungsaufnahme	Maximaler Strom während der Fahrt	Maximaler Strom beim Umfahren des Hindernisses
Fahrer 1	21,14 W	15,50 A	47,00 A
Fahrer 2	22,40 W	23,00 A	46,60 A
Fahrer 3	20,72 W	22,62 A	70,17 A
Fahrer 4	22,68 W	29,94 A	57,98 A

Tabelle 4.9: Auswirkungen verschiedener Fahrer auf das Betriebsverhalten der elektromechanischen Lenkung

Der Einfluss des Fahrers auf das dynamische Verhalten der elektromechanischen Lenkung ist erheblich. Der maximale Strom während der Fahrt bewegt sich bei den einzelnen Fahrern zwischen 15 A und 30 A. Der Ursache hierfür liegt darin, dass die Fahrer die Kurven zum Teil mit unterschiedlichen Lenkwinkeln und Geschwindigkeiten durchfahren, wodurch sich die Lenkunterstützung und damit die Leistungsaufnahme des Elektromotors ändert. Ähnliches gilt beim Umfahren des Hindernisses. Die maximale Stromaufnahme kann sich dabei zwischen 46 A und 70 A bewegen. Der hohe Strom von 70 A resultiert daraus, dass das Lenkrad im Fahrzeugstillstand gedreht und anschließend erst angefahren wurde. Deutlich geringer sind die Ströme, wenn erst während der Anfahrphase die Räder gedreht werden.

4.3.2.3 Vor- und Nachlaufbetrieb

Der Vor- und Nachlaufbetrieb wird einerseits vom Fahrer und andererseits automatisch von den Steuergeräten bestimmt. Die hierfür benötigte Ladungsmenge aus der Batterie ist abhängig vom Ausstattungsgrad des Bordnetzes, der Fahrzeugmotorisierung und der Motortemperatur nach dem Fahrbetrieb. Tabelle 4.10 zeigt mög-

	Otto 2.0l, Basis	Diesel 1.9l, Basis	Diesel 1.9l, High
Vorlaufbetrieb	0,073 Ah	0,097 Ah	0,302 Ah
Nachlaufbetrieb	0,657 Ah	0,657 Ah	1,007 Ah
Gesamt	0,730 Ah	0,754 Ah	1,309 Ah

Tabelle 4.10: Benötigte Ladungsmengen für Vor- und Nachlaufbetrieb in Abhängigkeit von der Motorisierung und dem Ausstattungsgrad

liche auftretende Ladungsmengen im Vor- und Nachlaufbetrieb exemplarisch für ein Fahrzeug mit konventionellem Antrieb mit zwei verschiedenen Motorisierungen und Bordnetzausstattungen, die vom Energiespeicher bereitgestellt werden müssen. Diese Ladungsmengen basieren hierbei auf den durchgeführten Vermessungen der Einzelkomponenten im Bordnetz.

Die für den Vorlaufbetrieb bei der Basisausstattung relevanten Komponenten sind die Zentralverriegelung (inkl. Blinklicht bei Fernbedienung), die Kraftstoffpumpe, die Innenraumbeleuchtung und der Starter. Den größten Anteil an der benötigten Ladungsmenge hat dabei der Starter. Dieser Anteil nimmt beim Dieselfahrzeug aufgrund der höheren Starterleistung zu. Die höhere Ausstattung führt zu einer deutlichen Steigerung der Ladungsmenge gegenüber der Basisausstattung während des

Vorlaufbetriebs. Dieses resultiert aus den zusätzlichen Komfortfunktionen wie Leaving Home und elektrische Sitz- und Lenkradverstellung. Mögliche verbaute Standheizungen sind hier nicht berücksichtigt.

Der Betrieb des Kühlerlüfters und der elektrischen Wasserpumpe zur Reduzierung der Stauwärme im Motorraum bei erhöhten Außentemperaturen und einiger Steuergeräte zur zeitbegrenzten Aufrechterhaltung bestimmter Funktionen nehmen den größten Anteil an der benötigten Ladungsmenge beim Nachlauf ein. Die höhere Ausstattung verursacht eine weitere Erhöhung des Nachlaufbetriebs durch die Coming Home -Funktion. Die Leaving/Coming Home - Funktionen deaktivieren beim Verlassen des Fahrzeugs die Nebelscheinwerfer, die Schluss- und Kennzeichenleuchten nach einer vom Fahrer eingestellten Verzögerungszeit (coming home) bzw. aktivieren diese, wenn der Fahrer die Verriegelung der Türen öffnet (leaving home).

4.3.2.4 Ruhezustand

Der Bordnetzstrom ist im Fahrzeugruhezustand ungleich Null, da einige Komfort- und Sicherheitsfunktionen auch im Ruhezustand aktiv sein müssen. Hierzu wurden bei drei Fahrzeugklassen Ruhestrommessungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 4.19 dargestellt sind.

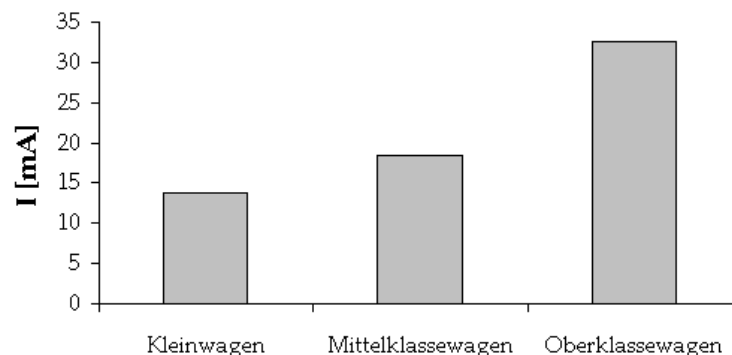


Abbildung 4.19: Ruhestrom in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse

Der Vergleich zeigt die starke Abhängigkeit von der Fahrzeugausstattung. Zu den auch im Ruhezustand aktiven Verbrauchern zählen unter anderem die Uhr, das Radio, die Alarmanlage und das Autotelefon. Einen weiteren Einfluss auf den Ruhestrom haben die Steuergeräte, die nicht von der Energieversorgung getrennt sind und sich im Sleep-Modus befinden. Ein zusätzliches Problem besteht darin, dass durch Softwarefehler die Steuergeräte aus dem Sleep-Modus aufwachen und Teilsysteme des Bordnetzes aufgrund der verteilten Funktionen aktivieren. Dadurch sind Ströme im Ruhezustand über 20 A möglich. Um bei Fahrzeugen, die z. B. mit dem Schiff

in andere Länder exportiert werden, die Batterie durch den Ruhestrom nicht tief zu entladen und somit zu schädigen, gibt es einen sogenannten Transportmodus. Dieser wird am Ende der Fahrzeugfertigung aktiviert. Beim Transportmodus werden Funktionen, die während des Transports nicht notwendig sind wie z. B. das Radio, die Uhr oder die Innenraumüberwachung ausgeschaltet bzw. von der Bordnetzbatterie getrennt.

4.4 Schlussfolgerungen

Ausgehend von der in den vorherigen Abschnitten durchgeführten Bordnetzanalyse können einige Schlussfolgerungen für den Entwicklungsprozess des Bordnetzes im Speziellen für die Dimensionierung der Energieversorgung gemacht werden. Heutige Bordnetze haben durch die Vielfalt an integrierten Funktionen in den Bereichen Antrieb, Sicherheit, Komfort und Infotainment und deren gegenseitige Vernetzung einen hohen Komplexitätsgrad erreicht. Zur Umsetzung der Bordnetzfunktionen sind unterschiedliche Aktoren verbaut. Die wesentlichen Gruppen sind hier die Elektromotoren, die Heizelemente und die Leuchtmittel. Das Betriebsverhalten und die Betriebsdauer dieser Aktorengruppen unterliegt äußeren Umwelteinflüssen, woraus unterschiedliche Leistungsaufnahmen über den Fahrzyklus resultieren können. Weiterhin erlangt die Bordnetzleistung einerseits durch die Vielzahl der Kurzzeit-, Langzeit- und Dauerverbraucher und andererseits durch das Betriebsverhalten der Elektromotoren für Bremssysteme und Lenkung ein dynamisches Verhalten. Die Dynamik ist mit kurzen Stromanstiegszeiten und hohen Maximalströmen verbunden, die aufgrund eines zum Teil nichtdeterministischen Betriebsverhaltens der Komponenten über einen Fahrzyklus variieren kann. Dieses Leistungsverhalten muss bei der Auslegung des Bordnetzes explizit berücksichtigt werden, weil hierdurch funktionsrelevante Spannungsabweichungen im Bordnetz auftreten können. Durch die Spannungsschwankungen können weitere Verbrauchergruppen betroffen sein. Gerade die Leuchtmittel reagieren schon bei geringen Abweichungen von der Betriebsspannung durch Flackern.

Aufgrund der heute im Bordnetz erreichten Komplexität ist eine einfache Strombilanzrechnung für die Auslegung der Energieversorgungskomponenten nicht mehr ausreichend. Um das Verhalten des Bordnetzes in Abhängigkeit von den in der Bordnetzanalyse identifizierten Einflussgrößen näherungsweise wiederzugeben und somit eine sichere Basis für die Auslegung der Energieversorgung zu gewährleisten, sind Simulationen innerhalb des Entwicklungsprozesses ein probates Mittel. Hierfür sind einerseits Komponentenmodelle für das Bordnetz zu entwickeln und andererseits deren Einflussgrößen in einem Umweltmodell abzubilden. Bei der Modellbildung ist ein Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und benötigter Simulations-

zeit einzugehen. Es muss daher eine Relevanz für die in der Modellbildung zu berücksichtigenden Komponenten abgeleitet und für die jeweiligen Komponenten eine entsprechende Modellierungstiefe definiert werden. Die notwendigen Kriterien für die Relevanz können dabei in Abhängigkeit von der Zielsetzung des Entwicklungsprozesses variieren. Des Weiteren sind die für die Batteriegröße wichtigen Betriebsphasen Vorlaufbetrieb, Nachlaufbetrieb und Ruhezustand in der Simulation mit zu berücksichtigen.

Durch die von den Automobilherstellern angebotenen Fahrzeugmodelle kann sich eine hohe Anzahl an Auslegungsszenarien für die Bordnetzenergieversorgung ergeben. Beispielsweise bietet die Volkswagen AG ca. 13 verschiedene Fahrzeugmodelle mit konventionellem Antrieb an. Hinzu kommt, dass im Durchschnitt ca. 10 unterschiedliche Motorisierungen pro Fahrzeug verfügbar sind. Außerdem kann man von 3 möglichen Getriebearten und jeweils 2 Reifengrößen pro Fahrzeugmodell ausgehen. Folglich ergeben sich bei 3 angenommenen Ausstattungsgraden mehr als 7000 notwendige Berechnungen für die Dimensionierungen der Bordnetzenergieversorgung der jeweiligen Fahrzeugmodelle, wenn man hierfür mindestens 3 charakteristische Betriebsszenarien zugrunde gelegt hat. Die Einführung alternativer Antriebskonzepte wird dabei zu einer weiteren Erhöhung der Berechnungen führen, weil die hier im Bordnetz verbauten Komponenten im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen zum Teil unterschiedlich installierte Leistungen aufweisen und somit andere Leistungsprofile zu erwarten sind. Hieraus resultiert die Notwendigkeit, automatisierte Softwarewerkzeuge innerhalb des Entwicklungsprozesses einzusetzen, die sowohl eine schnelle als auch eine zuverlässige Dimensionierung der Bordnetzenergieversorgung in Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben erlauben.

5 Modellbildung und Simulation (S)

In Kapitel 4 wurde die Bordnetzanalyse eines aktuellen Kfz-Bordnetzes beschrieben. Es zeigt sich eine sehr hohe Komplexität und Dynamik in einem solchen Netz. Zusätzlich können Steuerungsalgorithmen, wie in Kapitel 3 beschrieben und in Abschnitt 6.3 noch gezeigt wird, die Energieflüsse im elektrischen Netz eines Kfz beeinflussen. Um diese Einflüsse bei der Entwicklung von Bordnetzkomponenten zu berücksichtigen, müssen diese in einer geeigneten Simulationsumgebung abgebildet werden. Zusätzlich müssen darin Modelle der Bordnetzkomponenten hinterlegt sein.

In diesem Kapitel werden daher zunächst die Grundlagen der Modellbildung und der technischen Simulation erläutert, bevor dann in den Abschnitten 5.2 und 5.3 auf die eigentliche Modellierung der Bordnetzkomponenten und die Validierung der Modelle eingegangen wird.

5.1 Grundlagen der technischen Simulation

Der Einsatz von Simulationen ist heute in vielen Bereichen der technischen Entwicklung unverzichtbar geworden. Die Vorteile des Einsatzes von Simulationen zeigen sich besonders am sogenannten V-Modell. Das V-Modell ist eine abstrakte Projektmanagementstruktur, die ihre Ursprünge im militärischen Sektor hat, heute jedoch auch in der Privatwirtschaft eingesetzt wird. Abbildung 5.1 zeigt dieses Modell für den Fall, dass keine Simulationen im Entwicklungsprozess durchgeführt werden. Treten in den Spezifikations-, Entwurfs- oder Designphasen unbemerkte Fehler auf, so werden diese erst wesentlich später, schlimmstenfalls erst während der Produktion erkannt. Die Behebung solcher Fehler ist dann nur mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich. Wenn jedoch bereits während der ersten Entwurfsphase Simulationen zur Verifizierung und Validierung der Spezifikation eingesetzt werden, können viele Fehler bereits frühzeitig entdeckt und beseitigt werden. Das entsprechend modifizierte V-Modell zeigt Abbildung 5.2.

In den nächsten Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 werden zunächst die Begriffe *System* und *Modell*, welche im Zusammenhang mit Simulationen immer wieder vorkommen, eingeführt und erklärt. Anschließend wird in Abschnitt 5.1.3 auf die Prinzipien der Mo-

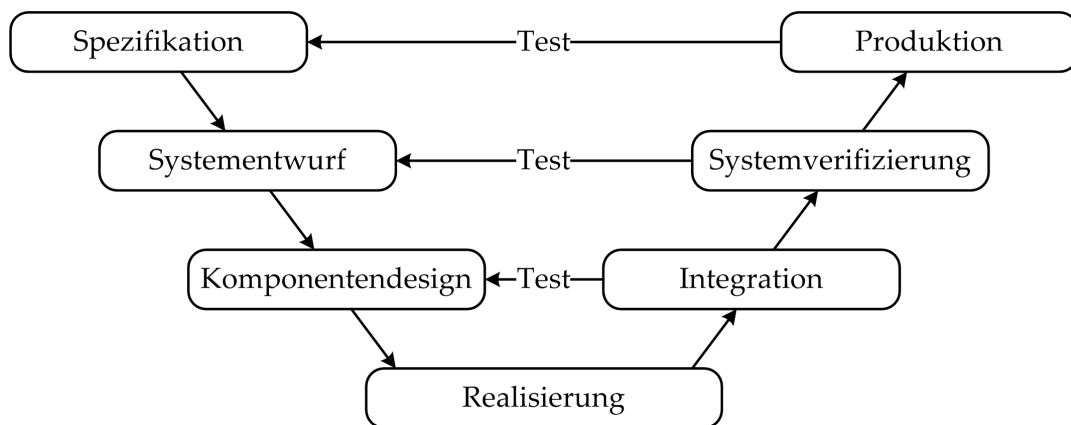


Abbildung 5.1: V-Modell ohne den Einsatz von Simulationen

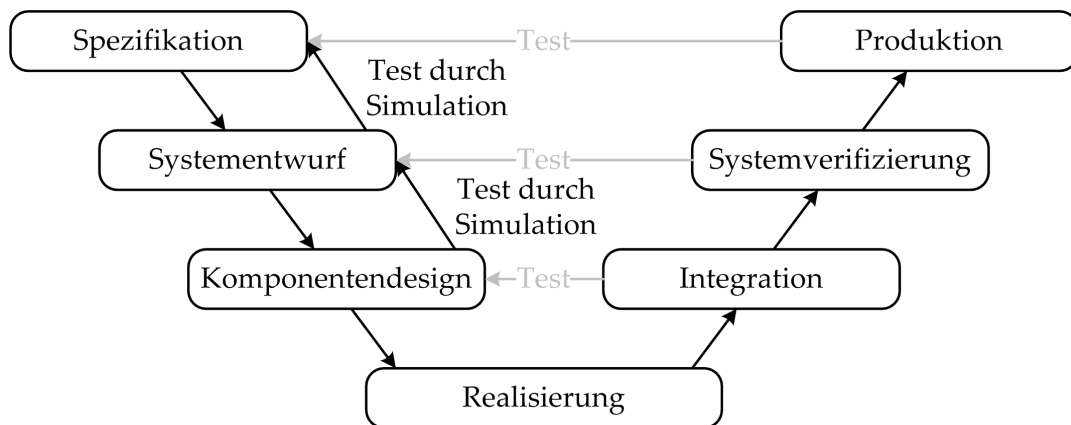


Abbildung 5.2: V-Modell mit Einsatz von Simulationen

Modellbildung und Simulationserstellung eingegangen. In Abschnitt 5.1.4 werden dann verschiedene Modellierungsverfahren und Software-Tools vorgestellt und bewertet. Abschnitt 5.1.5 beschäftigt sich mit verfügbaren Modellbibliotheken und deren Eignung für den in dieser Arbeit behandelten Einsatz. In den Abschnitten 5.1.6 und 5.1.7 wird dann auf die Auswahl der für die jeweilige Problemstellung relevanten Komponenten sowie die Festlegung der notwendigen Modellgüte eingegangen.

5.1.1 Was ist ein System?

Ein zentraler Begriff bei der Modellbildung und Simulation ist der des *Systems*. Als System werden Objekte bezeichnet, die die folgenden drei Eigenschaften besitzen [14]:

1. Dem Objekt lässt sich ein Systemzweck zuordnen, der für einen Beobachter erkennbar ist. Das Objekt erfüllt also eine bestimmte Funktion.

2. Das Objekt besteht aus Elementen, zwischen denen Beziehungen (innere Relationen) bestehen, z. B. gegenseitige Wechselwirkungen.
3. Das Objekt ist ohne den Verlust seiner Systemidentität nicht teilbar. Es existieren also Elemente oder Relationen, durch deren Herauslösung oder Zerstörung der ursprüngliche Systemzweck nicht mehr gegeben ist.

Zur Verdeutlichung seien an dieser Stelle zwei Beispiele genannt. Ein Tisch ist ein System, weil er einen bestimmten Zweck erfüllt, eine innere Struktur besitzt (Bein, Tischplatte, Schrauben) und seine Elemente miteinander in Beziehung stehen (die Schrauben halten Tischplatte und Beine zusammen). Zudem würde die Entfernung bestimmter Elemente seine Funktion beeinträchtigen oder unmöglich machen. Ein Sandhaufen dagegen ist kein System. Es existiert zwar ein Systemzweck (Lagerung von Sand), aber das Entfernen eines Teils des Sandes würde die Identität als Sandhaufen nicht verändern.

Je nach Betrachtungsweise und Betrachtungszeitraum kann ein System als statisch oder dynamisch bezeichnet werden. Wird ein Tisch über einen relativ kurzen Zeitraum betrachtet, so kann er als statisch angesehen werden, weil sich sein Zustand nicht verändert. Über mehrere Jahre betrachtet, können allerdings Alterungseffekte (Biegung, Abrieb) auftreten, die je nach Betrachtung von Bedeutung sein können. In diesem Falle wäre er als dynamisches System zu bezeichnen.

Die schematische Darstellung eines Systems zeigt Abbildung 5.3. Wichtig für die Be-

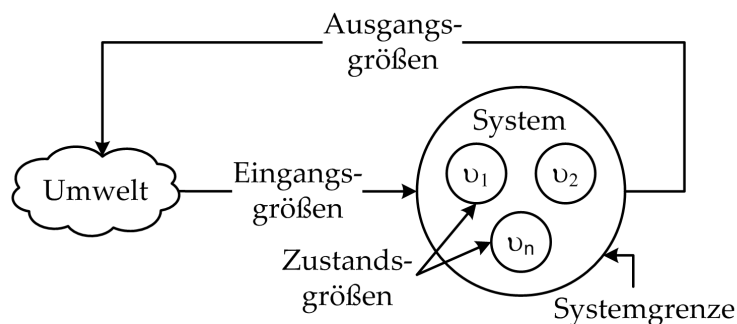


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung eines Systems (vgl. [41])

schreibung eines Systems ist dessen inneres Verhalten, das durch Zustandsgrößen abgebildet wird. Dabei sind alle Zustandsgrößen eines Systems voneinander unabhängig. Das heißt, dass keine Zustandsgröße aus einer Kombination anderer Zustandsgrößen ableitbar ist, und dass jede Zustandsgröße für die Beschreibung des Systems unbedingt notwendig ist. Die Anzahl der Zustandsgrößen entspricht der Dimensionalität des Systems.

Ein System besitzt zudem eine Systemgrenze, durch die es von der Umwelt abgegrenzt wird. Dies ermöglicht die isolierte Betrachtung und Modellierung des Systems. Die Lage der Systemgrenze kann je nach Beschreibungszweck variieren. Über diese Systemgrenze tritt das System mit der Umwelt über Ein- und Ausgangsgrößen (äußere Relationen) in Kontakt. Dabei können die Ausgangsgrößen sowohl von den Eingangsgrößen als auch von den Zustandsgrößen abhängig sein.

5.1.2 Was ist ein Modell?

Um Aussagen über das Verhalten eines Systems zu machen, bietet sich zunächst die Möglichkeit an, das System selbst zu beobachten und Experimente mit ihm durchzuführen. Dies ist die präziseste Vorgehensweise, die allerdings sehr häufig nicht anwendbar ist. Zum Beispiel lässt sich das Verhalten einer Weltraummission vor dem eigentlichen Start nicht am realen Objekt selbst testen. Hierfür ist es notwendig, das System zu modellieren, also zum Beispiel durch mathematische Gleichungen zu beschreiben und sein Verhalten zu simulieren.

Dabei ist ein Modell immer eine vereinfachte Abbildung des Systems. Je nach Modellzweck beschränkt sich diese Abbildung auf bestimmte Ausschnitte des Systemverhaltens und auch die Genauigkeit der Abbildung ist abhängig vom Modellzweck. Dementsprechend wird ein Modell immer für einen speziellen Modellzweck entwickelt. Ohne diese Spezialisierung würde das Modell zu komplex und fehleranfällig. Soll ein System aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden, so können auch mehrere Modellzwecke definiert werden, was wiederum zur Erstellung unterschiedlicher Modelle führt. Der Modellzweck ist daher die wichtigste Vorgabe der Modellentwicklung. Seine Formulierung sollte möglichst präzise sein, um eine effiziente Modellentwicklung zu ermöglichen.

Um das Verhalten eines Systems zu modellieren, gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten:

1. Nachahmung des Verhaltens
2. Nachbildung der Systemstruktur
3. Eine Mischform aus Punkt 1 und 2

Bei der Nachahmung des Verhaltens wird die eigentliche Systemstruktur nicht berücksichtigt. Es wird ausschließlich das Verhalten des Systems nachgebildet, wobei dafür jede beliebige Konstruktion verwendet werden kann. Das System wird als *black box* verstanden. Bei der zweiten Möglichkeit wird die Systemstruktur so weit wie für den Modellzweck notwendig nachgebildet. Dafür muss die Wirkungsstruktur, nicht jedoch das Verhalten des Systems bekannt sein, da sich letzteres aus der Wirkungsstruktur ergibt. Das System wird bei dieser Modellierungsart als durchsichtige

glass box verstanden. Die Mischform der beiden genannten Verfahren wird eingesetzt, wenn die Wirkungsstruktur und die Verhaltensparameter des Systems jeweils nicht vollständig erfasst werden können. Die Systemstruktur wird dabei so gut wie möglich nachgebildet und auf das Verhalten des Systems parametrisiert.

5.1.3 Digitale Simulation

Unter dem Begriff *Simulation* wird heutzutage im Allgemeinen die digitale Simulation in einem Rechner und nicht die analoge Simulation mit Hilfe von elektronischen Schaltungen verstanden. Daher wird auch hier nicht auf analoge Simulationen eingegangen, wobei einige der hier diskutierten Aspekte auch für analoge Simulationen gelten.

Die meisten Systeme beinhalten Zusammenhänge, die nur mit Hilfe von Differenzialgleichungen beschrieben werden können. Zudem sind viele dieser Zusammenhänge nichtlinear. Um diese Systeme zu modellieren und berechenbar zu machen, müssen sie zunächst linearisiert werden. Für die Lösung der Differenzialgleichungen müssen in der Simulation geeignete Integrationsverfahren angewendet werden. Auf diese Punkte wird in den nächsten zwei Abschnitten genauer eingegangen. In Abschnitt 5.1.3.3 wird dann die Wahl der Simulationsschrittweite diskutiert, bevor in Abschnitt 5.1.3.4 auf das Problemfeld der algebraischen Schleifen eingegangen wird.

5.1.3.1 Linearisierung

In Modellen müssen häufig nichtlineare Zusammenhänge oder Kennlinien abgebildet werden. Da diese Nichtlinearitäten oft auch nicht durchgängig durch Funktionen beschreibbar sind, kann es sinnvoll sein, sie zu linearisieren, sie also abschnittsweise durch Geraden zu approximieren. Die folgende Gleichung beschreibt allgemein eine Gerade zwischen zwei Stützstellen (x_1, y_1) und (x_2, y_2) .

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 \right) \quad (5.1)$$

Mit dieser Gleichung kann jedes Signal linearisiert werden. Abbildung 5.4 zeigt dies an einem Beispiel.

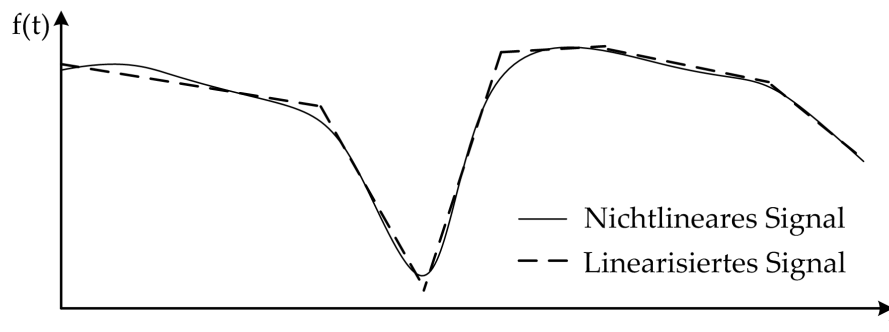


Abbildung 5.4: Linearisierung eines Signals

5.1.3.2 Integrationsverfahren

Die Integration spielt bei einer Simulation eine wichtige Rolle. Dabei gibt es zwei Anwendungen der Integration:

1. Integration eines Kurvenzugs (z. B. zur Flächenberechnung)
2. Lösung gewöhnlicher Differenzialgleichungen

In beiden Fällen ist die Berechnung des Integrals über eine Stammfunktion kaum möglich, da die zu integrierenden Signale oft nicht mathematisch beschreibbar oder nur abschnittsweise bekannt sind. Daher werden numerische Integrationsverfahren verwendet.

Für den ersten Fall existieren mehrere Verfahren, wobei an dieser Stelle nur auf die *Trapezregel* eingegangen werden soll. Die Fläche unter der Kurve wird mit Trapezen approximiert. Abbildung 5.5 zeigt die Trapezregel an einem Beispiel.

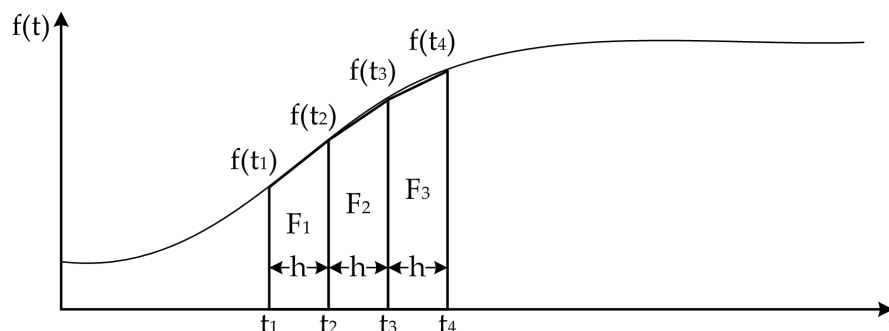


Abbildung 5.5: Integration nach der Trapezregel

Für eine Teilfläche ergibt sich folgende Gleichung:

$$F_n = \frac{f(t_n) + f(t_{n+1})}{2} \cdot h \quad (5.2)$$

Für die Gesamtfläche zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_n lautet die Gleichung:

$$F = \sum_{k=1}^n F_k = h \cdot \left[\frac{f(t_1)}{2} + f(t_2) + \dots + f(t_{n-1}) + \frac{f(t_n)}{2} \right] \quad (5.3)$$

Durch die Approximation der Fläche entsteht bei der Integration nach der Trapezregel ein Fehler. Dieser lässt sich durch die Verringerung der Abtastzeit h minimieren. Eine bessere Approximation ist durch den Einsatz anderer Integrationsverfahren möglich, die allerdings an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

Zur Lösung von Differenzialgleichungen bieten sich neben der Trapezregel auch viele weitere numerische Integrationsverfahren an. An dieser Stelle soll kurz das Euler-Verfahren am Beispiel folgender Differenzialgleichung erläutert werden:

$$\dot{x}(t) = f(x, t) \quad (5.4)$$

Die Funktion $x(t)$ sei um den Zeitpunkt t_k stetig und differenzierbar. Dann kann der Funktionswert zum Zeitpunkt $t_k + h$ (h sei die Schrittweite) mit der Taylorreihe

$$x(t_k + h) = x(t_{k+1}) \quad (5.5)$$

$$= x(t_k) + \dot{x}(t_k) \cdot \frac{h}{1!} + \ddot{x}(t_k) \cdot \frac{h^2}{2!} + \dots \quad (5.6)$$

bestimmt werden. Für das Euler-Verfahren wird die Taylorreihe nach dem zweiten Glied abgebrochen:

$$x(t_k + h) = x(t_k) + \dot{x}(t_k) \cdot h \quad (5.7)$$

Ein weiteres häufig eingesetztes Integrationsverfahren ist das *Runge-Kutta-Verfahren*, welches in der Regel eine bessere Approximation als das Eulerverfahren liefert. Es gilt folgende Berechnungsvorschrift:

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (5.8)$$

mit

$$k_1 = h \cdot f \{x(t_k), t_k\} \quad (5.9)$$

$$k_2 = h \cdot f \left\{ x(t_k) + \frac{1}{2}k_1, t_k + \frac{h}{2} \right\} \quad (5.10)$$

$$k_3 = h \cdot f \left\{ x(t_k) + \frac{1}{2}k_2, t_k + \frac{h}{2} \right\} \quad (5.11)$$

$$k_4 = h \cdot f \{x(t_k) + k_3, t_k + h\} \quad (5.12)$$

Es kann vorkommen, dass die Wahl des Integrationsverfahrens einen signifikanten Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. Daher sollte die Simulation bei Bedarf mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden, um so mögliche Fehler auszuschließen.

5.1.3.3 Simulationsschrittweite

Bei einer analogen Simulation (z. B. der Lösung einer Differenzialgleichung mit Hilfe einer Operationsverstärkerschaltung) kann jedem Zeitpunkt t genau ein Wert $f(t)$ (z. B. eine Spannung) zugeordnet werden. Dies ist bei einer digitalen Simulation in einem Rechner nicht möglich, da diese zeit- und wertediskret abläuft. In Abbildung 5.6 ist dieser Unterschied dargestellt. Bei der digitalen Simulation können die Signalwerte nur zu den durch die Simulationsschrittweite vorgegebenen Zeitpunkten und dann nur in der durch die Auflösung des Wertebereichs des Rechners bestimmten Quantisierung bestimmt werden.

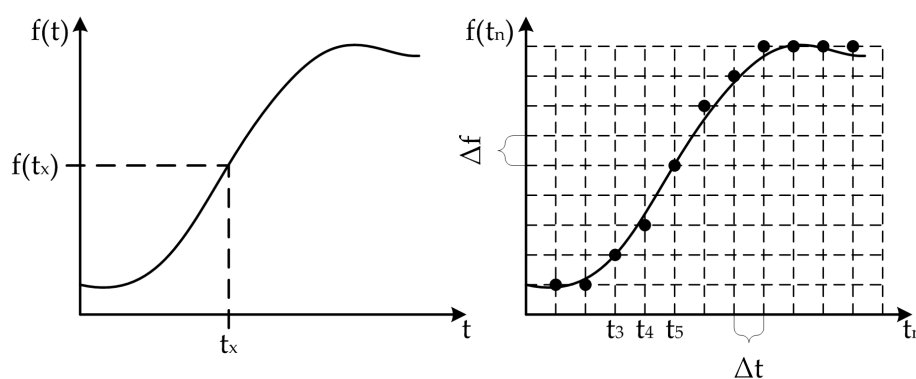


Abbildung 5.6: Unterschied zwischen analoger und digitaler Simulation

Besonders die zeitliche Diskretisierung kann zu Problemen bei der digitalen Simulation führen. Daher muss die Simulationsschrittweite der Dynamik der simulierten

Modelle angepasst werden. Wird sie zu groß gewählt, wird das Simulationsergebnis ungenau. Durch kleine Schrittweiten wird zwar das Ergebnis verbessert, durch die erhöhte Anzahl von Rechenschritten können jedoch vermehrt Rundungsfehler auftreten, die sich wiederum negativ auf die Ergebnisgüte auswirken. Wird die Schrittweite zudem unnötig klein gewählt, kostet dies Rechenleistung.

Zur Optimierung von Genauigkeit und Rechenzeit kann eine variable Schrittweite sinnvoll sein. Die Schrittweite wird dann bei Bedarf zur Laufzeit angepasst, in Phasen von geringer Dynamik wird sie vergrößert, in Phasen mit hoher Dynamik entsprechend verringert. Abbildung 5.7 zeigt den Unterschied zwischen fester und variabler Schrittweite.

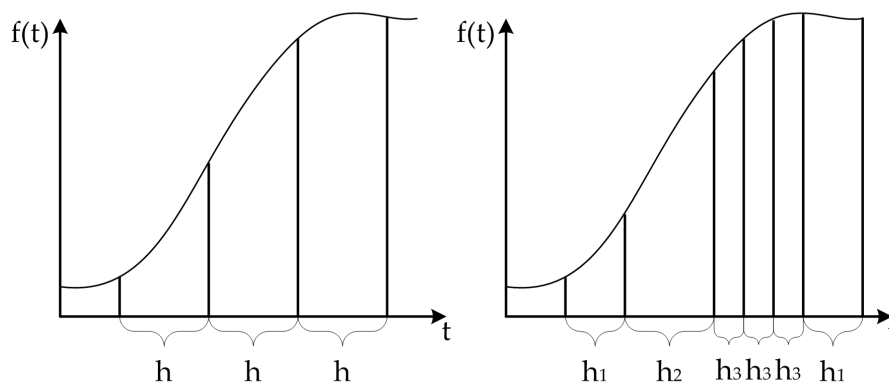


Abbildung 5.7: Schrittweitenwahl

Um ein genügend genaues Simulationsergebnis zu erhalten, sollte die Simulationsschrittweite immer in der Größenordnung

$$h = \frac{T_{min}}{10} \quad (5.13)$$

liegen, wobei T_{min} die kleinste im System auftretende Periodendauer ist. [16]

5.1.3.4 Algebraische Schleifen

Durch Rückführungen in einem Signalflussbild (z. B. Regelkreise) können algebraische Schleifen entstehen. D.h., dass eine in einer Gleichung berechnete Größe gleichzeitig als Eingangswert für die Gleichung benötigt wird. Abbildung 5.8 zeigt dies an einem Beispiel.

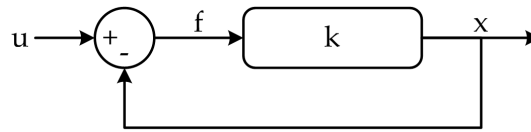


Abbildung 5.8: Beispiel einer algebraischen Schleife

Es ergibt sich folgende Systemgleichung:

$$x = k \cdot f \quad (5.14)$$

$$= k(u - x) \quad (5.15)$$

Wird diese Gleichung während der Simulation berechnet, so ergibt sich mit den Anfangswerten $f = x = 0$ und $u = 1$ für den n -ten Berechnungsschritt:

$$x(n) = \sum_{m=1}^n (-1)^{m+1} \cdot k^m \quad (5.16)$$

Diese Potenzreihe konvergiert nur für $-1 < k < 1$. Dadurch kann es während der Berechnung zu Problemen kommen. Viele Simulationsprogramme erlauben daher solche Schleifen nicht oder warnen den Anwender entsprechend.

5.1.4 Modellierungsverfahren und Tools

Zu Beginn der Modellierung erfolgt die Entwicklung des Modellkonzepts. Dafür muss zunächst der Modellzweck definiert werden, d.h. welche Eigenschaften des Systems im Modell abgebildet werden sollen und welche Güte dafür benötigt wird. Dies bestimmt dann die Modellart (Verhaltensmodell, Strukturmodell, Mischform). Je nach Modellart müssen dann bestimmte Daten des Systems ermittelt werden, z. B. durch Messungen. Anschließend werden die Systemstruktur und das Verhalten des Systems als sogenanntes *Wortmodell* formuliert. Hierbei handelt es sich um die Angabe von grundlegenden Abhängigkeiten zwischen den inneren und äußeren Relationen sowie die Beschreibung des Systemverhaltens.

Das Wortmodell muss anschließend in ein Simulationsmodell überführt werden. Dafür müssen zunächst ein geeignetes Modellierungsverfahren und eine geeignete Modellierungs- und Simulationsumgebung gefunden werden. Darauf wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

5.1.4.1 Modellierungsverfahren

In Abschnitt 5.1.2 wurde bereits auf die drei grundsätzlichen Ansätze zur Modellierung eingegangen (Nachahmung des Verhaltens, Nachbildung der Systemstruktur, Mischform). An dieser Stelle sollen verschiedene Verfahren vorgestellt werden, mit denen diese Modellierungsansätze verfolgt werden können.

Bei der *kennlinienbasierten Modellierung* handelt es sich um eine Nachahmung des Verhaltens. Die entsprechende Komponente wird unter verschiedenen Randbedingungen vermessen und die so gewonnenen Daten in zum Teil mehrdimensionalen Look-Up-Tabellen abgelegt. Eine Look-Up-Table ist eine Datenstruktur, die komplizierte Laufzeitberechnungen durch einen einfachen Zugriff auf die Datenstruktur ersetzt. Dies führt zu einem signifikanten Geschwindigkeitsgewinn, sofern die benötigten Speicherzugriffe schneller sind als die normale Berechnung. Ein klassisches Beispiel ist eine trigonometrische Tabelle, etwa für den Sinus. Dessen Berechnung ist sehr aufwendig und bei jedem Aufruf der Funktion wiederholt nötig. Daher werden zu Beginn einige Werte des Sinus berechnet und in einer Tabelle gespeichert, z. B. für jede ganze Gradzahl. Später, wenn ein konkreter Sinus berechnet werden soll, rundet die Funktion die gewünschte Gradzahl und liest den Sinuswert aus der Tabelle. Während der Simulation wird dann auf die Daten in der Look-Up-Table zurückgegriffen. Werte, die nicht gemessen wurden, werden interpoliert bzw. extrapoliert. Kennlinienbasierte Modelle sind relativ einfach zu erstellen. Allerdings sind diese Modelle auf den vermessenen Wertebereich beschränkt. Die Intra- und Extrapolation sind immer nur Annahmen. Die Rechenzeit während der Simulation ist bei diesem Verfahren sehr gering. Lediglich die Inter- bzw. Extrapolation muss berechnet werden. Diese Methode wird häufig angewendet, wenn sehr komplexe Systeme modelliert werden müssen, deren Struktur z. B. nicht ausreichend bekannt ist oder die bei Abbildung der Struktur zu rechenintensiv wären.

Häufig werden Systeme mit *Ersatzschaltbildern* modelliert. Dabei wird die Struktur abstrahiert und z. B. mit elektrischen Grundelementen (Widerstände, Spannungsquellen, etc.) abgebildet. Dadurch wird das elementare Verhalten des Systems abgebildet, es handelt sich um die bereits erwähnte Mischform der Modellierungsansätze.

Die exakteste und gleichzeitig rechenintensivste Modellierungsart ist die *Finite Elemente Methode (FEM)*. Sie ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweisen Lösung von partiellen Differenzialgleichungen. Das untersuchte Lösungsgebiet wird zunächst in Gitterzellen, die finiten Elemente, eingeteilt. Für jedes Element wird unter den Randbedingungen der angrenzenden Elemente eine Lösung der Differenzialgleichungen berechnet. Je kleiner die Elemente gewählt werden, desto genauer ist die Gesamtlösung. Diese Modellierungsart eignet sich z. B. für die Untersuchung jeglicher Art von Feldern (z. B. Magnetfelder, Strömungsfelder) oder Temperaturvertei-

lungen. In der Automobilentwicklung wird sie insbesondere für die Simulation des Crashverhaltens von Fahrzeugen eingesetzt. Sie ist jedoch sehr rechenintensiv und wird in dieser Arbeit daher nicht eingesetzt.

5.1.4.2 Modellierungssprachen und Tools

Auf dem Markt existieren sehr viele verschiedene Simulationstools, die ihrerseits verschiedene Modellierungssprachen unterstützen. Diese Tools lassen sich in drei Kategorien einteilen [16]:

- mathematisch orientiert (z. B. *Matlab*)
- signalflussorientiert (z. B. *Simulink*)
- symbolorientiert (z. B. *Simplorer*)

Bei der Verwendung der mathematisch orientierten Tools werden die Modelle direkt mit Gleichungen beschrieben. Der Anwender muss das zu modellierende System z. B. durch Differenzialgleichungen beschreiben und diese Gleichungen in das Simulationstool eingeben. Hierfür ist eine genaue Kenntnis der Grundlagen der physikalischen Zusammenhänge des Systems notwendig, z. B. Kenntnisse über das Verhalten eines Masse-Dämpfer-Systems bei einer Simulationssaufgabe aus dem Bereich der Mechanik. Zudem ist die Darstellung komplexerer Systeme mit Hilfe von Differenzialgleichungen für den Anwender nicht unbedingt übersichtlich. Diese Übersichtlichkeit wird von signalflussorientierten Systemen verbessert. Allerdings eignen sie sich nur bedingt für die Abbildung physikalischer Zusammenhänge, da auch hier wieder eine genaue Grundlagenkenntnis notwendig ist.

Die meisten Tools nutzen eine proprietäre Sprache zur Modellierung, was zur Inkompatibilität zwischen den einzelnen Tools führt. Ein anderer Ansatz wird mit der Sprache *VHDL-AMS* verfolgt. *VHDL-AMS* ist eine Erweiterung der Beschreibungssprache *VHDL* (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language). *VHDL* ist eine Hardwarebeschreibungssprache, vergleichbar mit einer Programmiersprache, mit der es möglich ist, komplizierte digitale Systeme zu beschreiben. [113]. Die Erweiterung *AMS* (Analog and Mixed Signal) ermöglicht zum einen die Beschreibung von analogen bzw. gemischt analog-digitalen Systemen und zum anderen die Modellierung in verschiedenen physikalischen Domänen (z. B. Elektrik, Thermik, Mechanik). Dabei kann sowohl mit Signalflüssen als auch mit konservativen Knoten gearbeitet werden. Ein konservativer Knoten ist ein Netzknoten, für den die Kirchhoff'schen Gesetze gelten. So lässt sich beispielsweise ein elektrisches Ersatzschaltbild direkt in *VHDL-AMS* darstellen. Der Simulator berechnet das Netzwerk dann mit Hilfe von Knoten- und Maschengleichungen. Außerdem unterstützt

VHDL-AMS die in Abschnitt 5.1.3.3 behandelte dynamische Schrittweitenregulierung. VHDL-AMS ermöglicht zudem sowohl die Modellierung auf Verhaltens- als auch auf Funktionsebene. Die Modellierungstiefe ist frei vom Anwender wählbar. VHDL-AMS-Modelle haben eine sehr hohe Portabilität und Wiederverwendbarkeit. Insbesondere in der Automobilindustrie zeichnet sich ein deutlicher Trend in Richtung VHDL-AMS ab. Die deutschen Automobilhersteller bereiten den Einsatz von VHDL-AMS vor und haben sich im Arbeitskreis 30 „Simulation gemischter Systeme“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) des Verbandes der Automobilhersteller (VDA) zusammengetan, um eine frei verfügbare Komponentenbibliothek zu erstellen (siehe Abschnitt 5.1.5).

Bei der Modellierung von Fahrzeugkomponenten im Rahmen dieser Arbeit ist vor allem die einfache Verbindung von elektrischen, thermischen und mechanischen Modellen wichtig, da viele Komponenten Anteile aus zwei dieser physikalischen Domänen besitzen. Außerdem müssen für einige Komponenten Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungen erstellt werden. Daher wird die Komponentenmodellierung in VHDL-AMS vorgenommen, während für die Modellierung von Energiemanagementalgorithmen ein signalflussorientiertes Tool sinnvoller ist. Es muss daher eine Simulationsumgebung gewählt werden, die sowohl VHDL-AMS als auch die Modellierung von Signalflüssen unterstützt. Für diese Arbeit wurden zwei Tools ausgewählt, *Simplorer* vom Hersteller *Ansoft* und *Matlab/Simulink* vom Hersteller *The Mathworks*.

Die Simulationssoftware *Simplorer* ist ein leistungsfähiges Tool für das Design komplexer technischer Systeme. Es werden verschiedene physikalische Domänen (Elektrik, Thermik, Mechanik, Hydraulik) unterstützt. Zudem vereinigt *Simplorer* vier Simulatoren in einer integrierten Entwicklungsumgebung:

- Schaltungssimulator (kompatibel zu SPICE¹)
- Blockdiagrammsimulator (Signalflusssimulator)
- Zustandsgraphensimulator
- VHDL-AMS-Simulator

Simplorer unterstützt in seinem Schaltungssimulator konservative Knoten. Dies ermöglicht die einfache Modellierung elektrischer Ersatzschaltbilder. Alle vier Simulatoren können außerdem parallel genutzt werden. Zusätzlich lassen sich über weitere Co-Simulationsschnittstellen Tools von Fremdanbietern mit *Simplorer* koppeln. Es existieren eine Reihe von Modellbibliotheken für verschiedene Anwendungsbereiche, z. B. für Automobilanwendungen oder mechanische Systeme. Außerdem sind

¹SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ist eine Software zur Simulation analoger, digitaler und gemischter elektrischer Schaltungen [111]

herstellerspezifische Bibliotheken verfügbar, z. B. für Bauteile von *Maxim* oder *Analog Devices*. Obwohl auch Simplorer die Signalflussmodellierung unterstützt, wurde für diese Aufgabe Matlab genutzt, weil dieses zusätzlich noch eine automatische Codegenerierung bietet, um das erstellte Modell z. B. für ein Steuergerät zu kompilieren (siehe auch Abschnitt 6.3.4.3).

Matlab und *Simulink* sind zwei Tools der Firma Mathworks. Matlab ist eine Art Programmiersprache für technische Berechnungen, Algorithmenentwicklung, numerische Berechnungen und Datenanalyse und -visualisierung. Matlab ist sehr universell einsetzbar, da eine Vielzahl von Erweiterungen (Toolboxes) verfügbar sind (z. B. Optimierungsverfahren, genetische Algorithmen etc.). Für Matlab existiert die Erweiterung *Simulink*. Simulink ist eine signalflussorientierte Modellierungsumgebung, die über eine interaktive grafische Benutzeroberfläche gesteuert wird. Neben Blockdiagrammen können auch Zustandsgraphen zur Modellierung genutzt werden.

Die beiden Tools werden über eine von Simplorer angebotene Schnittstelle gekoppelt. Diese Schnittstelle wird in Abschnitt 6.4.2.1 genauer dargestellt.

5.1.5 Bestehende Modelle

In diesem Abschnitt werden verfügbare VHDL-AMS-Modelle und Modellbibliotheken vorgestellt. Im Lieferumfang von Simplorer sind neben proprietären Modellen bereits eine große Zahl von VHDL-AMS-Modellen enthalten. Dazu gehören:

- Grundelemente für Netzwerke verschiedener physikalischer Domänen (Elektrik, Thermik, Mechanik und Magnetik)
- Blöcke zur Signalverarbeitung
- Zeitfunktionen

Alle diese VHDL-AMS-Modelle sind quelloffen und dienen als Basis für die in dieser Arbeit erstellten Modelle. Ansoft bietet für Simplorer noch weitere Modellbibliotheken an, dazu gehört z. B. auch eine spezielle Automotive-Bibliothek, welche in dieser Arbeit jedoch nicht verwendet wurde, da die Modelle weder in VHDL-AMS geschrieben sind, noch quelloffen sind.

Der Verband deutscher Automobilhersteller (VDA) hat zusammen mit mehreren Zulieferern den Arbeitskreis *VDA/FAT-AK 30* gebildet, in dem die Eignung von VHDL-AMS bei der Entwicklung realer heterogener Systeme im Automobilbau ermittelt werden soll. Dafür wird eine offene Modellbibliothek entwickelt. In dieser Bibliothek sind zurzeit nur wenige Modelle vorhanden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um

Grundelemente wie Quellen und passive Bauelemente. Diese Bibliothek bietet daher keine Erweiterung der bereits von Simplorer zur Verfügung gestellten Modellbibliothek und wird daher nicht genutzt. Weitere offene Bibliotheken sind zurzeit nicht verfügbar. Für die Modellierung wurde daher auf die in Simplorer vorhandenen VHDL-AMS-Modelle zurückgegriffen.

5.1.6 Methodik zur Auswahl relevanter Komponenten

Je nach Aufgabenstellung müssen bestimmte Komponenten bei der Simulation berücksichtigt werden, während andere vernachlässigbar sind. Beispielsweise haben die Blinkleuchten auf das energetische Verhalten des Bordnetzes während eines Fahrzyklus nur sehr geringen Einfluss und können daher meist vernachlässigt werden. Hingegen haben Komponenten wie die Kühlsysteme wesentlich größeren Einfluss und müssen dementsprechend berücksichtigt werden. Zur Festlegung, welche Komponenten berücksichtigt werden müssen, sind entsprechende Kriterien notwendig.

Die Festlegung dieser Kriterien für die Auswahl der Komponenten zur Modellbildung erfolgt in Abhängigkeit von den zu entwickelnden Funktionen aus dem aktiven und passiven Energiemanagement. Für die folgenden Betrachtungen sollen hierzu die optimale Dimensionierung der Energieversorgung im Bordnetz innerhalb des passiven Energiemanagements und die Vermeidung kritischer Bordnetzsituationen innerhalb des aktiven Energiemanagements als Grundlage dienen. Die Kriterien des passiven Energiemanagements sind daher die Nennleistung, die Betriebsdauer und die Betriebshäufigkeit der verbauten Komponente. Dabei werden die Komponenten für die Energiebilanzierung ausgewählt und in die Modellbildung übernommen, die als Minimalanforderungen eine erhöhte Nennleistung, eine kurze Betriebsdauer und eine geringe Häufigkeit (Mindestkriteriensatz I) oder eine geringe Nennleistung, eine lange Betriebsdauer und eine hohe Häufigkeit (Mindestkriterien II) besitzen.

Da innerhalb des aktiven Energiemanagements Komponenten berücksichtigt werden sollen, die beim kritischen Batterieladezustand abgeschaltet werden können, sind andere Kriterien anzusetzen. Dazu zählen neben der Nennleistung, Peakleistung und Betriebsdauer die Steuerbarkeit der Komponente und deren Betriebskategorie. Um für ein aktives Energiemanagement überhaupt in Betracht gezogen zu werden, muss die Komponente steuer- bzw. regelbar sein und darf nicht der Betriebskategorie Sicherheit zugeordnet sein. Alle relevanten Komponenten für ein aktives Energiemanagement werden dabei zusätzlich im Modell mit einer bidirektionalen Informationsschnittstelle zum Austausch von Zustands- und Sollwerten (z. B. Temperatur) und einem Steuereingang versehen.

Die entsprechenden Mindestkriterien innerhalb des passiven und aktiven Energiemanagements sind, wie in den Abbildungen 5.9 und 5.10 verdeutlicht, definiert wor-

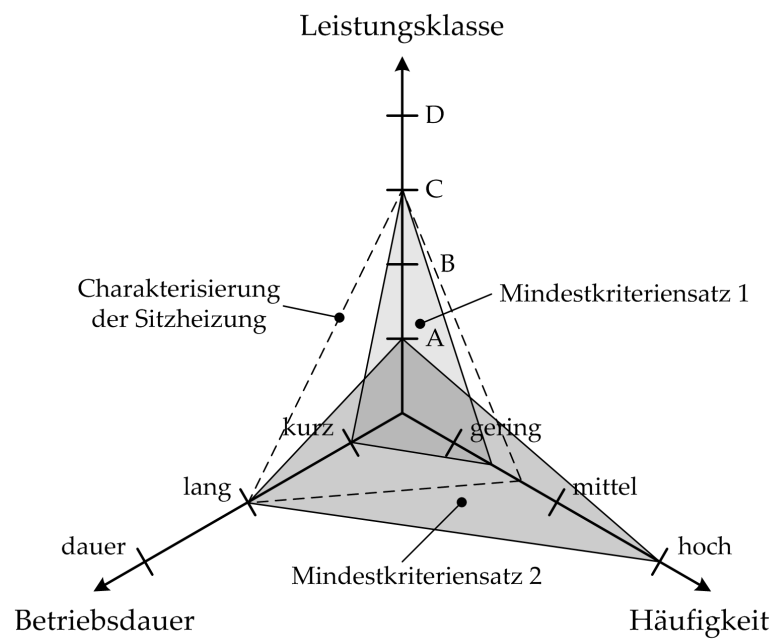


Abbildung 5.9: Kriterien für die Einbindung in ein passives Energiemanagement

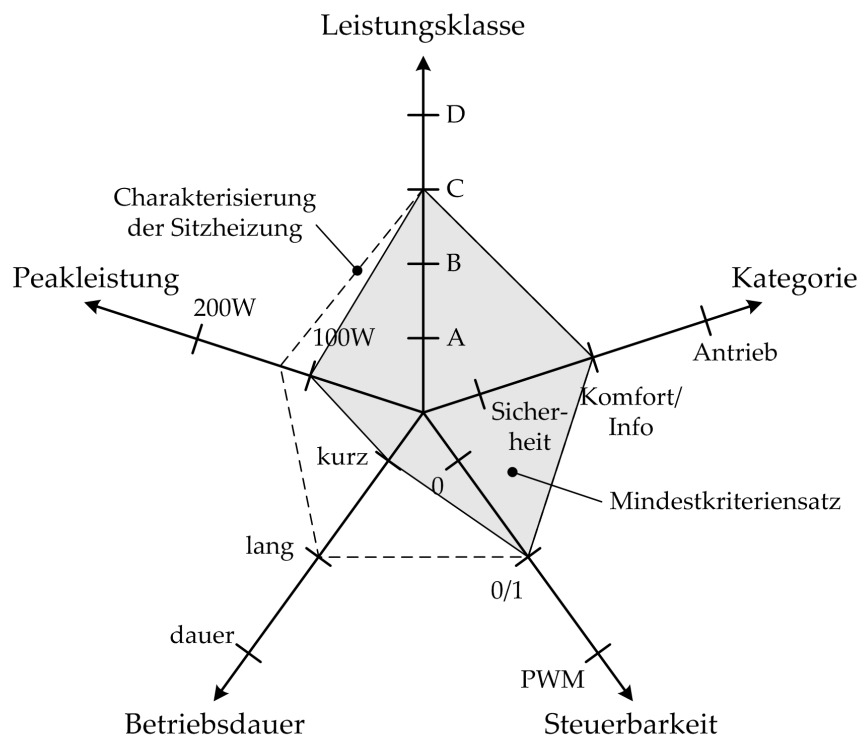


Abbildung 5.10: Kriterien für die Einbindung in ein aktives Energiemanagement

den. Die grau hinterlegten Flächen in den Netzdiagrammen stellen dabei die relevanten Mindestanforderungen an die Komponenten dar. Die charakteristischen Kenngrößen einer Komponente müssen dabei größer als die in den Netzdiagrammen vorgegebenen Mindestgrößen sein, um für die Modellbildung berücksichtigt zu werden. In beiden Diagrammen sind exemplarisch die Kenngrößen von der Sitzheizung gestrichelt eingezeichnet. Die Sitzheizung erfüllt hier die Kriterien sowohl des aktiven als auch des passiven Energiemanagements. Hieraus folgt, dass das Modell der Sitzheizung einerseits in der Simulation für die Funktion des passiven Energiemanagements berücksichtigt und andererseits mit einer bidirektionalen Informationsschnittstelle für die aktive Energiemanagement-Funktion ausgestattet werden muss.

5.1.7 Festlegung der benötigten Modellgüte

Nach Auswahl der Komponenten anhand der Kriterien für das passive und aktive Energiemanagement erfolgt die Festlegung des Detaillierungsgrades für die Modellbildung. Die Detaillierungsgrade sind in Tabelle 5.1 definiert. Der Detaillierungsgrad

Detaillierungsgrad	Beschreibung	Beispiele
I	Ein- und Ausschalten der Komponente mit statischer Leistungsaufnahme	Abblendlicht, Fernlicht, Signalhorn
II	Gesteuerte und geregelte Komponente mit dynamischer Leistungsaufnahme, Ein- und Ausschaltvorgänge	Lenkung, Kühlmittelpumpe, Kühlerlüfter, Fensterheber
III	Berücksichtigung thermischer Effekte	Sitzheizung, Heckscheibenheizung
IV	Berücksichtigung zusätzlicher parasitärer Effekte	nicht verwendet

Tabelle 5.1: Definition der Detaillierungsgrade

der ausgewählten Komponenten kann dabei in Abhängigkeit der zu entwickelnden Funktionen innerhalb des aktiven und passiven Energiemanagements variieren. Für

das Komponentenmodell Sitzheizung resultiert aus der Funktion „Optimale Dimensionierung der Energieversorgung im Bordnetz“ des passiven Energiemanagements ein ausreichender Detaillierungsgrad von II. Bezieht man zusätzlich die Funktion „Vermeidung kritischer Bordnetzsituationen“ des aktiven Energiemanagements mit ein, so ist der Detaillierungsgrad auf III zu erhöhen. Der Grund dafür ist, dass für die Entwicklung dieser aktiven Energiemanagement-Funktion die Wahrnehmbarkeit des Fahrzeuginsassen berücksichtigt und somit das thermische Verhalten der Sitzheizung mit im Modell abgebildet werden muss. Für die Komponentenmodelle wurden basierend auf den in dieser Arbeit betrachteten Funktionen des aktiven und passiven Energiemanagements die Detaillierungsgrade I bis III vorgegeben. Die Vorgabe des Detaillierungsgrades IV für die Modellbildung ist dagegen beispielsweise nur notwendig, wenn Funktionen des passiven Energiemanagements zur konstruktiven Parameteroptimierung der einzelnen Komponenten vorgenommen werden können und sollen.

5.2 Komponentenmodellierung

In diesem Abschnitt wird genauer auf die Modellierung der einzelnen Fahrzeugkomponenten eingegangen. Zunächst werden in Abschnitt 5.2.1 die Grundlagen der Komponentenmodellierung und anschließend in Abschnitt 5.2.2 die Modelle der Energieversorgungskomponenten beschrieben. Die Abschnitte 5.2.3, 5.2.4 und 5.2.5 beschäftigen sich mit den Bordnetzverbrauchern.

5.2.1 Grundlagen der Modellierung

In den beiden folgenden Abschnitten werden die Grundlagen der Komponentenmodellierung vorgestellt. Zunächst werden in Abschnitt 5.2.1.1 die für diese Arbeit benötigten Möglichkeiten und Eigenschaften der Modellierungssprache VHDL-AMS genauer erläutert. In Abschnitt 5.2.1.2 werden dann Konventionen für die Modellierung vorgestellt, die für diese Arbeit eingeführt wurden.

5.2.1.1 VHDL-AMS

Ein VHDL-AMS-Modell besteht aus mehreren Teilen. Die Schnittstellenbeschreibung erfolgt in der *Entity*. Hier wird definiert, welche Eingangs- und Ausgangsgrößen das Modell hat und über welche konservativen Knoten es verfügt. Der Entity folgen eine oder mehrere Modellbeschreibungen, sogenannte *Architectures*. Hier erfolgt die eigentliche Modellierung. Im folgenden wird auf diese Teile genauer eingegangen.

Der folgende Code-Ausschnitt zeigt die Entity eines Widerstandsmodells. In der ers-

```

1 ENTITY resistor IS
2   PORT (
3     QUANTITY R    : IN  RESISTANCE := 1.0e+3;
4     QUANTITY I_R  : OUT CURRENT;
5     TERMINAL p,m  : ELECTRICAL
6   );
7 END ENTITY resistor;
```

Quelltext 5.1: Entity eines Widerstandsmodells

ten Zeile wird der Name der Entity *resistor* definiert. Anschließend folgt die eigentliche Schnittstellendefinition. In diesem Beispiel werden zwei nichtkonservative Ports (*QUANTITY*) definiert. In Zeile 3 ist dies der Eingangsport *R* als Widerstandsgröße mit dem Standardwert 1000. Dieser Wert kann später bei der Simulation des Modells mit einem anderen Wert überschrieben werden. Anschließend folgt die Definition des Ausgangsports *I_R*. Hier wird der Strom, der durch den Widerstand fließt, ausgegeben. In Zeile 5 folgt dann die Definition der zwei konservativen Knoten (*TERMINAL*) *p* und *m*. Diese werden als elektrische (*ELECTRICAL*) Knoten gekennzeichnet. Für sie gelten entsprechend die Kirchhoff'schen Gesetze. In Zeile 7 wird die Entity abgeschlossen.

Nach der Schnittstellendefinition folgt die Modellbeschreibung. Eine mögliche Beschreibung zeigt der folgende Code-Ausschnitt:

```

1 ARCHITECTURE behaviour OF resistor IS
2   QUANTITY u ACROSS i THROUGH p TO m;
3 BEGIN
4   u == i*R;
5   I_R == i;
6 END ARCHITECTURE behaviour;
```

Quelltext 5.2: Architecture eines Widerstandsmodells

Nach der Namensdefinition *behaviour* der Architecture folgen lokale, als nur in der jeweiligen Modellbeschreibung nutzbare, Definitionen von Quantities und Terminals. In diesem Beispiel wird mit einer *Across-Through-Quantity* ein physikalischer Zusammenhang definiert:

1. Zwischen den Knoten *p* und *m* liegt die Spannung *u*
2. Der Strom *i* fließt von Knoten *p* zum Knoten *m*

In der anschließenden Beschreibung (Zeile 3 bis 6) wird noch der Zusammenhang zwischen der Spannung u und dem Strom i mit Hilfe des ohmschen Gesetzes ausgedrückt. Hier wird auf den in der Entity definierten Eingangsport R zugegriffen. Die folgende Gleichung setzt den Ausgangsport I_R , indem sie ihm den Strom i zuweist.

Neben elektrischen konservativen Knoten können auch Knoten aus anderen physikalischen Domänen definiert werden:

THERMAL thermischer Knoten

MAGNETIC Knoten eines magnetischen Kreises

ROTATIONAL Knoten eines mechanischen Systems (rotatorisch)

TRANSLATIONAL Knoten eines mechanischen Systems (translatorisch)

5.2.1.2 Modellierungskonventionen

Damit die erstellten Modelle einen möglichst einheitlichen Aufbau und einheitliche Schnittstellen haben, wurden einige Konventionen definiert, die an dieser Stelle dargestellt werden.

Bei Modellen elektrischer Verbraucher ist die Schnittstelle wie folgt definiert:

```
1 ENTITY verbraucher IS  
2   PORT (  
3     QUANTITY schalter : IN REAL := 0.0;  
4     QUANTITY i_in      : OUT CURRENT;  
5     TERMINAL u_in      : ELECTRICAL;  
6     TERMINAL gnd       : ELECTRICAL  
7   );  
8 END ENTITY verbraucher;
```

Quelltext 5.3: Standard-Entity eines Verbrauchermodells

Mit dem Steuereingang *schalter* kann der Verbraucher ein oder ausgeschaltet werden. Der Standardwert 0 bedeutet, dass er ausgeschaltet ist. Über den Port *i_in* gibt das Modell den aufgenommenen Strom aus. Strom, der in die Komponente hineinfließt, ist dabei positiv. Bei Modellen von Quellen oder Speichern (z. B. Batterie) ist der hineinfließende Strom ebenfalls positiv, der herausfließende dementsprechend negativ. Neben diesen beiden nichtkonservativen Ports hat jedes Verbrauchermodell die zwei konservativen elektrischen Knoten *u_in* für die Eingangsspannung und *gnd* als Masseknoten.

Je nach Bedarf können weitere Ports definiert werden. Bei thermischen Modellen (z. B. Sitzheizung) kommen z. B. noch konservative thermische Knoten hinzu.

In Abschnitt 5.1.7 wurde bereits auf die Notwendigkeit von unterschiedlichen Detaillierungsgraden eingegangen. Bei der Modellierung wird der Detaillierungsgrad des Modells im Namen der Architecture in der Form *level_n* angegeben, wobei *n* der Detaillierungsgrad ist. Sollen für eine Komponente unterschiedlich detaillierte Modelle erstellt werden, so werden dementsprechend mehrere Architectures definiert. Wenn zusätzlich für einen Detaillierungsgrad unterschiedliche Modelle erstellt werden sollen, so ist hinter der Bezeichnung *level_n* eine weitere Bezeichnung anzuhängen, z. B. *level_1_kennlinie1*.

5.2.2 Energieversorgungskomponenten

Die Auslegung der Energieversorgung für das Bordnetz ist eine der zentralen Simulationaufgaben. Daher müssen die dazugehörigen Komponenten entsprechend genau modelliert werden. In Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben sind dies die Bordnetzbatteie und der Generator, welcher in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben durch einen DC/DC-Wandler ersetzt wird. Für den Generator existiert bereits ein ausreichend genaues Modell in der VHDL-AMS-Bibliothek von Simplorer, daher wird hierfür kein weiteres Modell erstellt. Die Modelle für den Bordnetzwanlder und die Bordnetzbatteie werden in den folgenden zwei Abschnitten vorgestellt.

5.2.2.1 Bordnetzwanlder

Der Bordnetzwanlder ist die zentrale Komponente der Energieversorgung des Bordnetzes in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Über ihn wird das 14 V Niederspannungsnetz aus dem Hochspannungsnetz mit Energie versorgt.

Für den Bordnetzwanlder wurden zwei Modelle mit dem Detaillierungsgrad II erstellt. Das erste ist ein Verhaltensmodell und basiert auf einem sehr einfachen Ersatzschaltbild, wie es in Abbildung 5.11 dargestellt ist. Dieses Modell wird für die Simulation kompletter Fahrzyklen mit Zykluslängen von über 1000 Sekunden genutzt.

Auf der Bordseite befindet sich eine ideale Spannungsquelle, deren Spannung U_{BN} abhängig vom Strom I_{BN} ist. Diese Abhängigkeit ist für verschiedene Wandler als Kennlinie hinterlegt. Aus der Bordnetzspannung und dem Bordnetzstrom wird zunächst die Bordnetzleistung P_{BN} berechnet. Zur Bestimmung des Eingangsstroms I_{TN} wird der Wirkungsgrad η berücksichtigt:

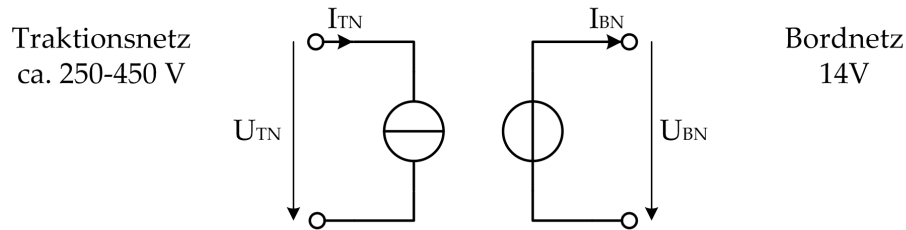


Abbildung 5.11: Einfaches Ersatzschaltbild für einen DC/DC-Wandler

$$P_{TN} = \frac{P_{BN}}{\eta} \quad (5.17)$$

$$I_{TN} \cdot U_{TN} = \frac{I_{BN} \cdot U_{BN}}{\eta} \quad (5.18)$$

$$I_{TN} = \frac{I_{BN} \cdot U_{BN}}{U_{TN} \cdot \eta} \quad (5.19)$$

Der Wirkungsgrad ist als Kennfeld in Abhängigkeit von der Traktionsnetzspannung U_{TN} und der Bordnetzleistung P_{BN} für verschiedene Wandler hinterlegt. Ein solches Wirkungsgradkennfeld zeigt Abbildung 5.12. Es wurde an einem realen Wandler vermessen.

Für eine genauere Betrachtung des Bordnetzwan­dler­verhaltens wurde ein zweites Modell erstellt. Es basiert auf dem Ersatzschaltbild eines Tiefsetz­stellers, wie es Abbildung 5.13 zeigt.

Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus einem Strukturmodell und einem Verhaltensmodell. Alle wesentlichen Komponenten eines DC/DC-Wandlers sind im Ersatzschaltbild abgebildet:

- Leistungsschalter S
- Speicherdrossel L mit ohmschen Widerstand R_L
- Freilaufdiode D
- Lade­kondensator C mit Innenwiderstand R_C

Der Schalter S wird von einem zusätzlich im Modell implementierten Regler mit einem PWM-Signal ($f_{PWM} = 50 \text{ kHz}$) angesteuert. Über die Veränderung der Pulsbreite erfolgt die Regelung der Ausgangsspannung auf einen Sollwert. Aufgrund der hohen Frequenz des PWM-Signals muss bei der Simulation dieses Wandlermodells die Simulationsschrittweite entsprechend klein gewählt werden, was wiederum zu

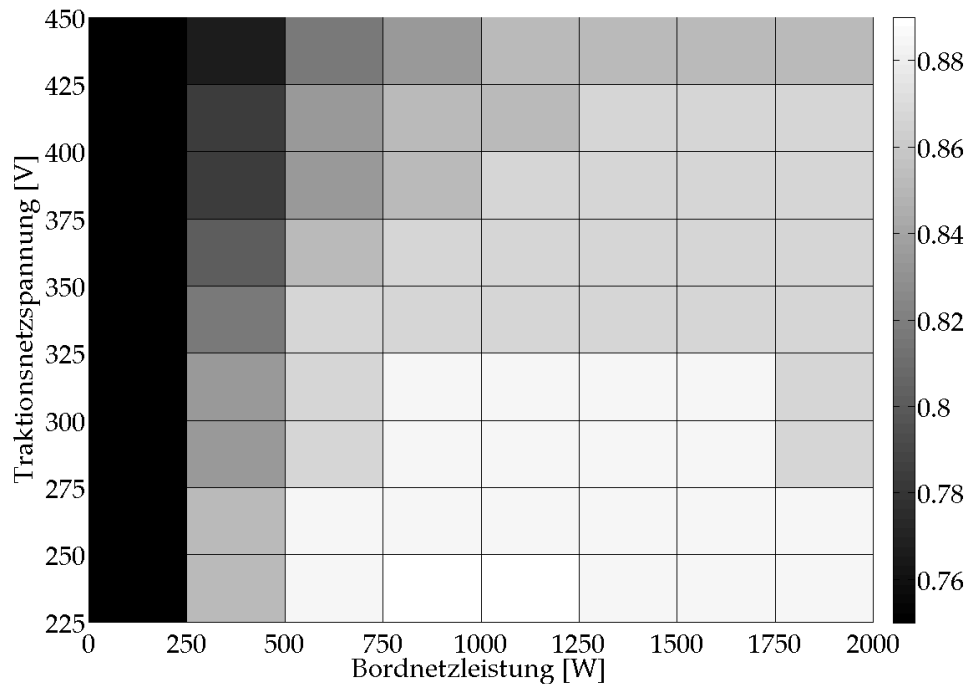


Abbildung 5.12: Gemessenes Wirkungsgradkennfeld eines Bordnetzwandlers

einer sehr großen Simulationsdauer führt. Daher kann dieses Modell nicht zur Simulation ganzer Fahrzyklen genutzt werden, sondern nur zur Betrachtung sehr kurzer Zeiträume von weniger als einer Sekunde. Dafür bildet dieses Modell die Latenzzeit des Wandlers bei Änderungen der Stromanforderung ab. In Abbildung 5.14 und 5.15 ist ein Vergleich der beiden Modelle zu sehen. Es wurde eine zweistufige Lastanhebung simuliert. Beim Kennlinienmodell folgen Spannung und Strom sofort der veränderten Last, da nur andere Werte aus den Kennlinien gelesen werden müssen. Das Strukturmodell bildet dagegen eine gewisse Dynamik ab. Bei einer Lastanhebung bricht zunächst die Spannung ein, bis dann der Regler im Wandler reagiert und die Spannung wieder anhebt. Wird die Last zu groß, kann der Regler die Spannung nicht mehr halten und diese sinkt dementsprechend ab.

5.2.2.2 Batterie

In den in Abschnitt 5.1.5 erwähnten Modellbibliotheken existieren bereits Batteriemodelle. Diese Modelle sind jedoch sehr komplex und benötigen entsprechend viel Rechenzeit. Daher wurde ein weiteres, vereinfachtes Modell erstellt. Für die Betrachtung der Batterie über einen Fahrzyklus reicht ein kennlinienbasiertes Modell aus, das das wesentliche Lade- und Entladeverhalten abbildet. Die Temperaturabhängig-

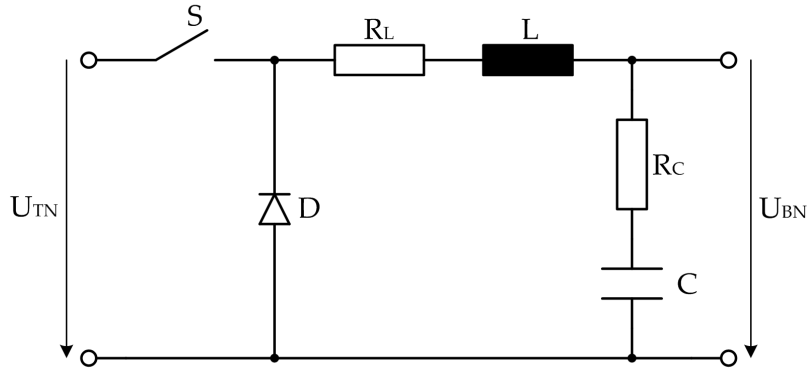


Abbildung 5.13: Ersatzschaltbild für einen Tiefsetzsteller

keiten und Effekte wie Alterung werden bei der Zyklusbetrachtung nicht berücksichtigt. Dadurch wird Rechenzeit eingespart.

Das Batteriemodell basiert auf dem Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle, bestehend aus einer idealen Spannungsquelle und einem Innenwiderstand, siehe Abbildung 5.16. Die Quellenspannung U_0 und der Innenwiderstand R_i sind abhängig vom Ladezustand (SOC) der Batterie. Diese Abhängigkeiten wurden mit einem Batterieprüfstand an einer realen 14 V Bordnetzbatterie gemessen und im Modell als Kennlinien hinterlegt. Dazu wurden der Lade- und Entladewirkungsgrad implementiert. Je nach Stromrichtung, negativer Klemmenstrom bedeutet Laden, positiver Klemmenstrom Entladen, wird die Leistung an den Batterieklemmen P_k mit dem entsprechenden Wirkungsgrad multipliziert und der Lade- bzw. Entladestrom I_{bat} errechnet:

$$P_{bat} = \begin{cases} \eta_{laden} \cdot P_k, & \text{für } I_k < 0 \text{ A} \\ \eta_{entladen} \cdot P_k, & \text{für } I_k > 0 \text{ A} \end{cases} \quad (5.20)$$

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_k} \quad (5.21)$$

Der Ladezustand der Batterie wird über eine Integration des Batteriestroms I_{bat} ermittelt, wobei Q_0 die Nennkapazität der Batterie darstellt:

$$Q(t) = \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (5.22)$$

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (5.23)$$

Das Modell kann sehr einfach an unterschiedliche Batteriegrößen Q_0 angepasst werden, da die Quellenspannung und der Innenwiderstand nur vom Ladezustand abhängen.

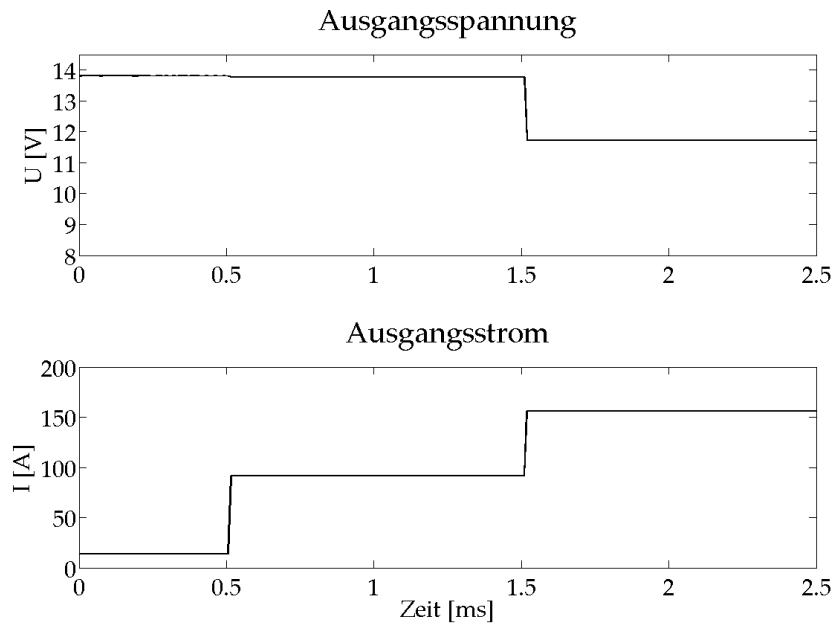


Abbildung 5.14: Simulierte Strom- und Spannungsverläufe beim Kennlinienmodell (nach Abbildung 5.11)

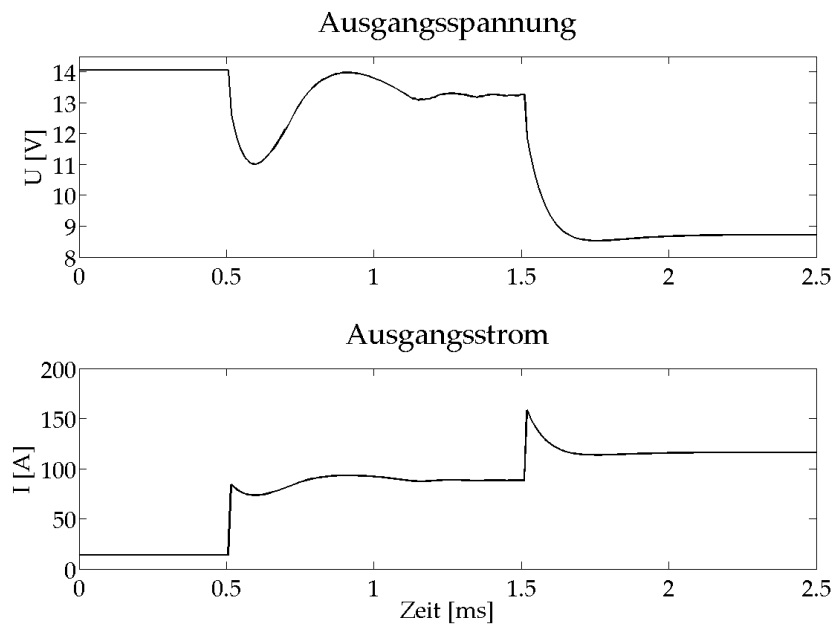


Abbildung 5.15: Simulierte Strom- und Spannungsverläufe beim Strukturmodell (nach Abbildung 5.13)

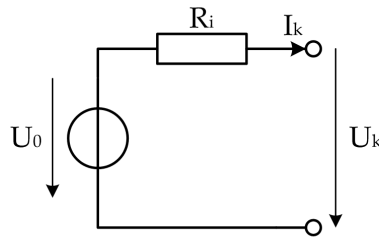


Abbildung 5.16: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Batterie

5.2.3 Elektromotoren

In Abschnitt 4.1.5.1 wurden bereits die im Fahrzeug typischerweise verbauten Arten von Elektromotoren vorgestellt. Um den Modellierungsaufwand möglichst gering zu halten, wurde für alle DC-Motoren ein allgemeines Modell entwickelt, das im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Das Modell der Unterdruckpumpe als spezieller Elektromotor wird in Abschnitt 5.2.3.2 näher erläutert. Für die elektromechanische Lenkung wird kein separates Modell erstellt, da für die Simulation kein Querdynamikmodell existiert, und somit keine Informationen über die Lenkbewegungen vorhanden sind. Die Lenkung wird daher nur als Konstantleistung berücksichtigt, siehe auch Abschnitt 5.2.5.

5.2.3.1 Allgemeines DC-Motor-Modell

Das allgemeine Motormodell bildet die wesentlichen Eigenschaften von DC-Motoren ab:

- Anlaufverhalten
- Bremsmoment durch innere Reibung
- Auslaufverhalten

Zur Abbildung dieser Eigenschaften wurde ein Modell auf Basis des Ersatzschaltbildes in Abbildung 5.17 erstellt. Dabei wurde ähnlich wie bei den thermischen Modellen mit der Analogie von elektrischen und mechanischen Systemen gearbeitet, wie sie in Tabelle 5.2 dargestellt ist. Auf der elektrischen Seite besteht das Modell aus dem Ankerwiderstand R_a , der Ankerinduktivität L_a und der Gegenspannungsquelle U_G . Auf der mechanischen Seite befinden sie die Drehmomentquelle T , die das Drehmoment M_a liefert, ein Dämpfungsglied C und ein Trägheitsmoment J . Einige dieser Elemente sowie der sogenannte Flussfaktor k müssen passend für die jeweilige

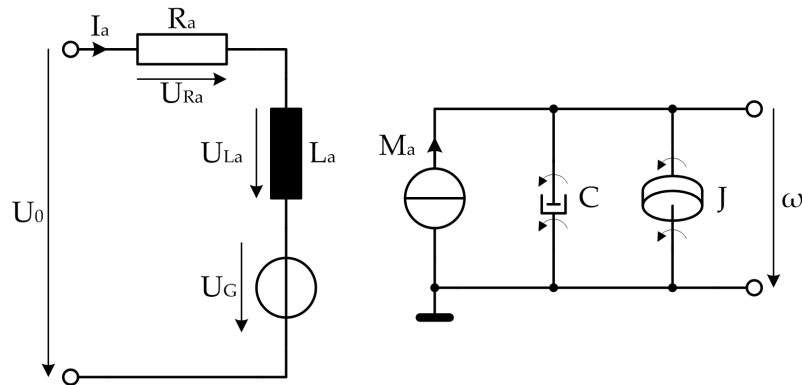


Abbildung 5.17: Ersatzschaltbild eines DC-Motors (elektrisch und mechanisch)

Elektrische Größe		Mechanische Größe	
Bezeichnung	Einheit	Bezeichnung	Einheit
Spannung U	V	Drehzahl n	1/s
Strom I	A	Drehmoment M	Nm
Leitwert G	A/V	Dämpfung d	Nm · s
Kapazität C	As/V	Trägheitsmoment J	kg · m ²

Tabelle 5.2: Analogie zwischen Elektrik und Mechanik

Komponente parametrisiert werden. Der Flussfaktor wird für die Berechnung des Antriebsmoments und der Gegenspannung mittels folgender Gleichungen benötigt:

$$U_G = k \cdot \omega \quad (5.24)$$

$$M_a = k \cdot I_a \quad (5.25)$$

Um das Modell für eine bestimmte Komponente zu parametrieren, muss diese vermessen werden. Der Ankerwiderstand und die Ankerinduktivität können mit einem entsprechenden Messgerät direkt bestimmt werden. Der Flussfaktor k wird bestimmt, indem der Motor bei einer bestimmten Eingangsspannung bis zum Stillstand gebremst wird und das erreichte Bremsmoment gemessen wird. Da in diesem Fall die Drehmomentquelle kurzgeschlossen ist, entspricht das gemessene Moment dem Antriebsmoment M_a . Mit Gleichung 5.25 kann dann der Flussfaktor berechnet werden. Zur Bestimmung der Eigendämpfung wird der Motor im Leerlauf betrieben und die Leerlaufdrehzahl und der Eingangsstrom gemessen. Wenn die Drehzahl konstant ist, ergibt sich die Dämpfung nach folgender Gleichung:

$$C = \frac{M_a}{\omega} = \frac{k \cdot I_a}{\omega} \quad (5.26)$$

Auch das Trägheitsmoment kann mit Hilfe einer Messung bestimmt werden. Dazu wird der Motor wieder im Leerlauf betrieben und dann die Spannungsversorgung abgeschaltet. Während der Motor ausläuft, wird die Drehzahl gemessen. Dieser Vorgang entspricht der Entladung eines Kondensators über einen Widerstand und kann aufgrund der bereits beschriebenen Analogie zwischen Elektrik und Mechanik mit der entsprechenden Kondensatorgleichung beschrieben werden:

$$\omega(t) = \omega_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot C}{J}} \quad (5.27)$$

Das Trägheitsmoment lässt sich dann mit dem Drehzahlmesswert zu einem beliebigen Zeitpunkt t_1 während des Auslaufvorgangs durch Umstellung dieser Gleichung berechnen:

$$J = \frac{t_1 \cdot C}{\ln\left(\frac{\omega_0}{\omega(t_1)}\right)} \quad (5.28)$$

Damit sind alle Parameter des Modells bekannt. Das Modell wurde für verschiedene im Fahrzeug verbaute Motoren entsprechend parametrisiert:

- Kühlerlüfter
- Batterielüfter
- Innenraumgebläse
- Kühlmittelpumpe

Alle weiteren Motoren (z. B. für Fensterheber, Sitzverstellung) wurde nur mit einem Modell des Detaillierungsgrades I abgebildet, siehe Abschnitt 5.2.5.

5.2.3.2 Unterdruckpumpe

Die Aktivierung der Unterdruckpumpe ist im Wesentlichen abhängig von der benötigten Bremskraft (siehe Abschnitt 4.3.2.2. In Abbildung 5.18) ist das Modell der Unterdruckpumpe dargestellt. Es handelt sich um ein rein mathematisches Modell, das hier zum besseren Verständnis als Signalflussmodell dargestellt ist. In Abbildung 5.19 sind die Signale innerhalb des Modells dargestellt. Als Eingangsgröße dient das Geschwindigkeitssignal (A), aus dem anschließend durch Differenziation die Beschleunigung berechnet wird. Wenn diese einen negativen Schwellwert a_s unterschreitet, oder wenn die Geschwindigkeit gleich 0 ist (Fahrzeugstillstand), ist der Ausgang des Oder-Gliedes gleich 1 (B). Dies entspricht der Betätigung des Bremspedals, wobei zur Vereinfachung von einer binären Aktivierung (Bremsen an/aus) ausgegangen wird. Dieses Bremsignal wird integriert (C). Dies entspricht dem *Verbrauch* von Unterdruck. Erreicht der Integrator eine bestimmte Schwelle i_s , wird er zurückgesetzt

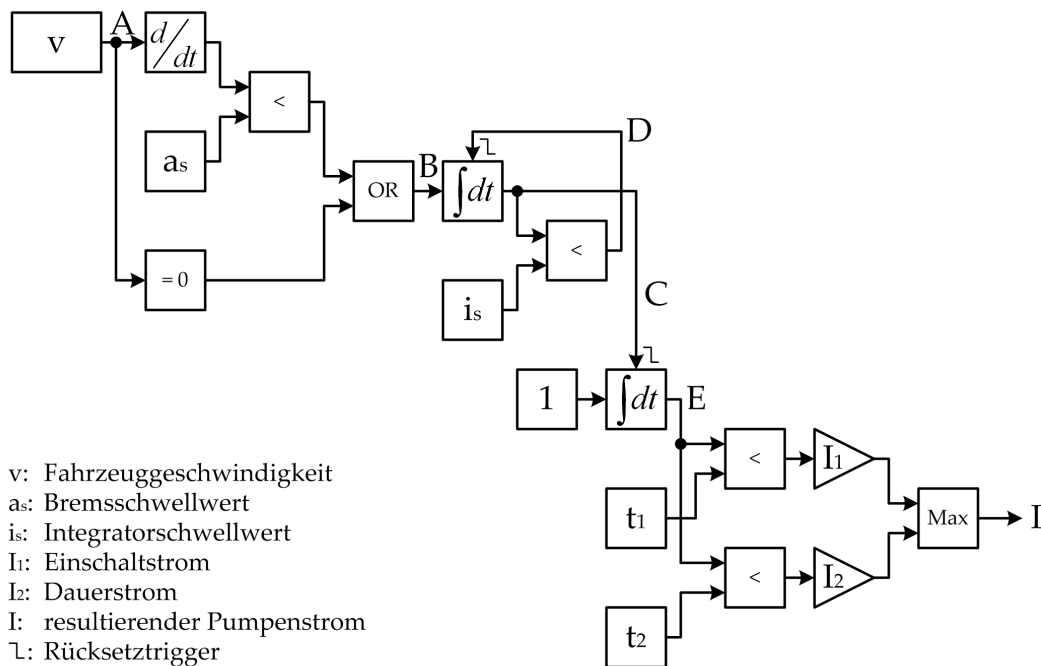


Abbildung 5.18: Signalflussmodell der Unterdruckpumpe

(D). Diese Flanke setzt gleichzeitig einen zweiten Integrator zurück (C). Dieser ist verantwortlich für die Ansteuerung der Unterdruckpumpe bzw. deren elektrischen Modells. Der Wert dieses zweiten Integrators (E) wird dafür mit zwei Schwellen t_1 und t_2 verglichen. Bis zum Erreichen der ersten Schwelle wird dem elektrischen Modell ein Steuerwert I_1 übermittelt, anschließend bis zum Erreichen der zweiten Schwelle der Steuerwert I_2 . Diese Steuerwerte entsprechen zum einen dem Einschaltstrom und zum anderen dem Dauerstrom der Unterdruckpumpe. Über die Schwellen kann der zeitliche Verlauf der Ströme parametrisiert werden. Bei entsprechender Wahl der Schwellwerte stimmt die Simulation sehr gut mit den realen Messwerten überein.

5.2.4 Heizsysteme

Die thermischen Komfortsysteme im Fahrzeug haben einen großen Einfluss auf das energetische Verhalten des Bordnetzes, da sie zum einen sehr leistungsstark sind und zum anderen oft über längere Zeit aktiviert werden. Dadurch sind sie zugleich prädestiniert für Eingriffe durch ein Energiemanagement, wobei diese möglichst so zu gestalten sind, dass die Insassen sie nicht bemerken. Um beurteilen zu können, ob ein Eingriff für die Insassen spürbar ist, muss das thermodynamische Verhalten der Systeme modelliert werden. Dafür ist zunächst ein thermodynamisches Modell des

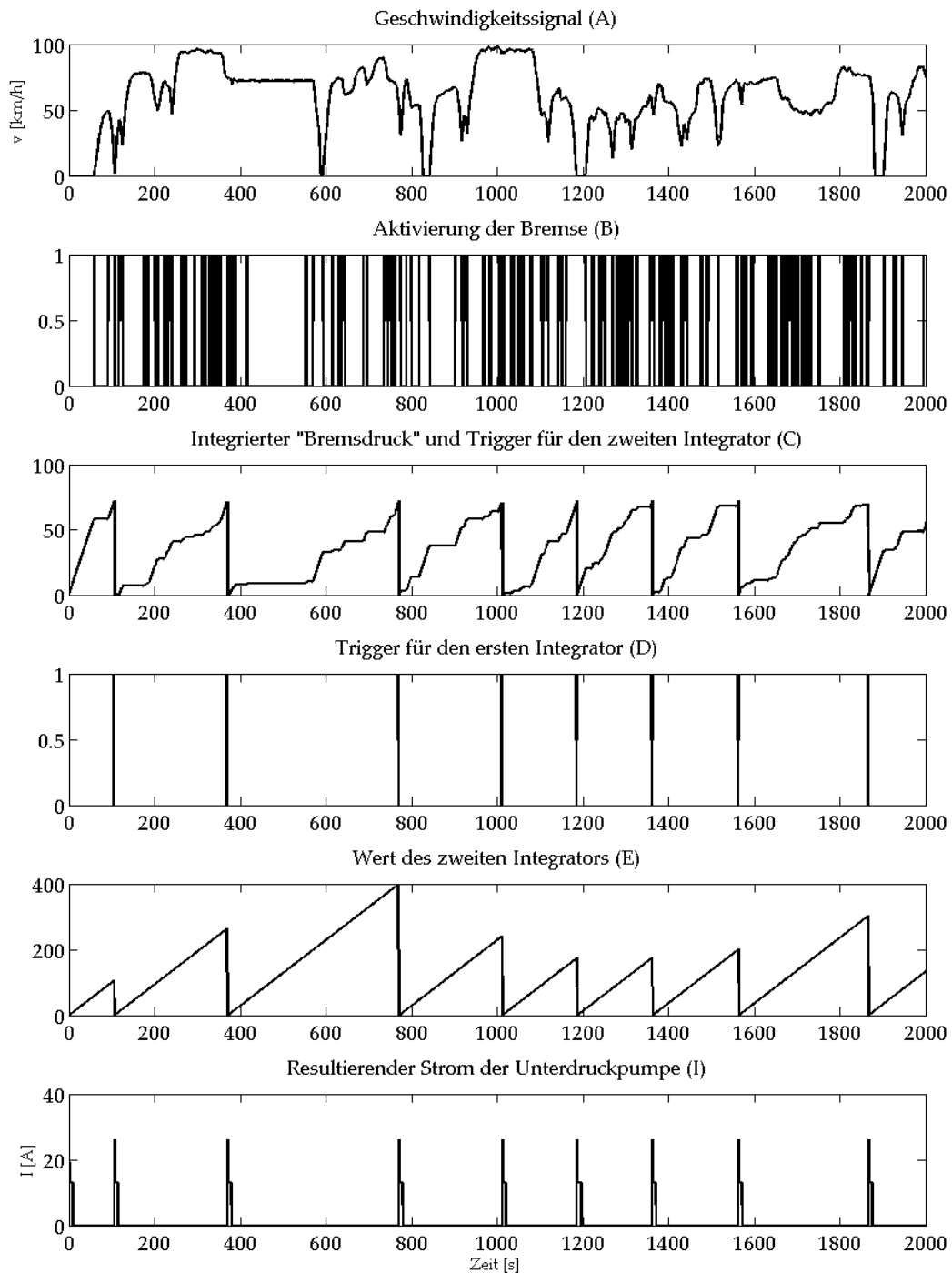


Abbildung 5.19: Signale des Modells der Unterdruckpumpe

Fahrzeuginnenraums und der Insassen notwendig, da diese mit den thermischen Komfortsystemen wechselwirken.

Bei der Modellierung der thermischen Systeme wird ausgenutzt, dass zwischen elektrischen und thermischen Systemen eine Analogie existiert, siehe Tabelle 5.3. Damit

Elektrische Größe		Thermodynamische Größe	
Bezeichnung	Einheit	Bezeichnung	Einheit
Spannung U	V	Temperatur θ	K
Strom I	A	Wärmestrom H	W
Widerstand R	V/A	Wärmewiderstand R_{th}	K/W
Kapazität C	As/V	Wärmekapazität C_{th}	Ws/K

Tabelle 5.3: Analogie zwischen Elektrik und Thermodynamik

ist es möglich, thermische Systeme ähnlich wie elektrische Schaltbilder zu modellieren.

5.2.4.1 Fahrzeugthermodynamik

Zur Abbildung des thermischen Verhaltens des Fahrzeuginnenraums wurden thermische Modelle für das Fahrzeug und für die Insassen entwickelt. Das thermische Fahrzeugmodell ist in Abbildung 5.20 zu sehen. Die Außentemperatur wird als ideale

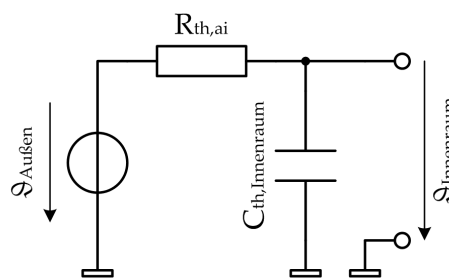


Abbildung 5.20: Thermisches Ersatzschaltbild des Fahrzeugs

Konstant-Temperaturquelle $\vartheta_{Außen}$ dargestellt, da davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrzeuginnenraum keine Rückwirkung auf die Umgebung hat. Über einen

thermischen Widerstand $R_{th,ai}$ (Scheiben, Karosserie) wärmt die Umgebung den Innenraum auf bzw. kühlt ihn ab. Der Innenraum wird dabei als thermische Kapazität $C_{th,Innenraum}$ modelliert, deren Größe wie folgt berechnet wird:

$$C_{th,Innenraum} = c_{th,Innenraum} \cdot m_{Innenraum} \quad (5.29)$$

$$\approx c_{th,Luft} \cdot V_{Luft} \cdot \rho_{Luft} \quad (5.30)$$

$$= 1,01 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot V_{Innenraum} \cdot 1,187 \frac{kg}{m^3} \quad (5.31)$$

Hierbei wird nur die Luft im Innenraum (Volumen $V_{Innenraum}$), nicht jedoch die Sitze usw. berücksichtigt, da deren thermische Zeitkonstanten relativ hoch sind. Für das Temperaturgefühl der Insassen ist daher die Umgebungsluft entscheidend. Nur zu den Sitzen besteht direkter Kontakt und diese werden im Modell der Sitzheizung entsprechend berücksichtigt.

Neben der Außentemperatur beeinflusst jeder Insasse die Temperatur im Fahrzeug. Daher wurde ein thermisches Insassenmodell entwickelt, welches in Abbildung 5.21 dargestellt ist. Der Mensch wird als Konstant-Temperaturquelle mit einer Tempera-

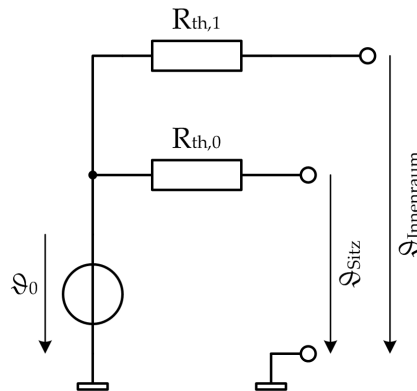


Abbildung 5.21: Thermisches Ersatzschaltbild einer Insasse

tur von 37 °C modelliert. Über zwei thermische Widerstände ist diese zum einem mit dem Fahrzeuginnenraum und zum anderen mit dem Sitz verbunden. An dieser Stelle erfolgt dann die Kopplung zum Modell der Sitzheizung, welche im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

5.2.4.2 Heizelemente

Die Heizsysteme im Fahrzeug haben, wie bereits erwähnt, großen Einfluss auf das energetische Verhalten des Bordnetzes. Zu den Heizsystemen zählen:

- Außenspiegelheizung
- Waschdüsenheizung
- Heckscheibenheizung
- Frontscheibenheizung
- Sitzheizung

Die ersten beiden Heizsysteme haben relativ geringe Leistungen und werden daher mit einem Modell des Detaillierungsgrades I abgebildet. Die Scheibenheizungen haben beide ein ähnliches Verhalten und können mit demselben Modell beschrieben werden. Dieses ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Auf der elektrischen Seite besteht es

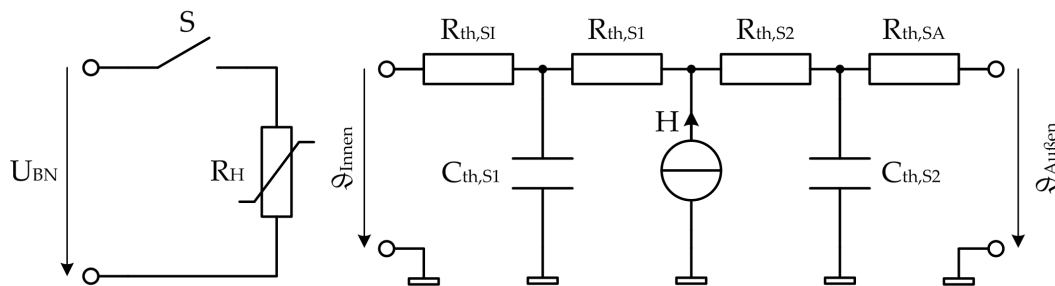


Abbildung 5.22: Ersatzschaltbild einer Scheibenheizung (elektrisch und thermisch)

nur aus einem Schalter und einem temperaturabhängigen Widerstand. Dieser bildet den Heizdraht der Scheibenheizung ab. Die im Widerstand umgesetzte elektrische Leistung wird auf der thermischen Seite des Modells als Wärmestrom dargestellt. Dieser teilt sich über die thermischen Widerstände der Scheibe in zwei Richtungen auf, einmal zum Fahrzeuginnenraum und einmal nach außen. Die Scheibe wird hierbei in eine *äußere* und eine *innere* Scheibe geteilt. Die beiden Widerstände $R_{th,S1}$ und $R_{th,S2}$ bilden den Wärmewiderstand der beiden Teilscheiben ab, während $C_{th,S1}$ und $C_{th,S2}$ die Wärmekapazitäten darstellen. Ihre Größe ergibt sich aus der Masse der Scheibe und der spezifischen Wärmekapazität des Glases. Mit den Widerständen $R_{th,S1}$ und $R_{th,SA}$ wird der Wärmeübergang von der Scheibe in den Innenraum und nach außen modelliert.

Die Sitzheizungen haben über den Sitzbezug direkten Kontakt zu den Insassen und damit auch signifikanten Einfluss auf deren Temperaturempfinden. Abbildung 5.23 zeigt das Modell für eine Sitzheizung. Auf der elektrischen Seite besteht es nur aus einem Schalter und einem temperaturabhängigen Widerstand. Dieser bildet die Heizelemente der Sitzheizung ab. Mit dem Schalter wird die Sitzheizung über einen ebenfalls modellierten Regelkreis so angesteuert, dass eine eingestellte Solltemperatur erreicht und gehalten wird. Die im Widerstand umgesetzte elektrische Leistung

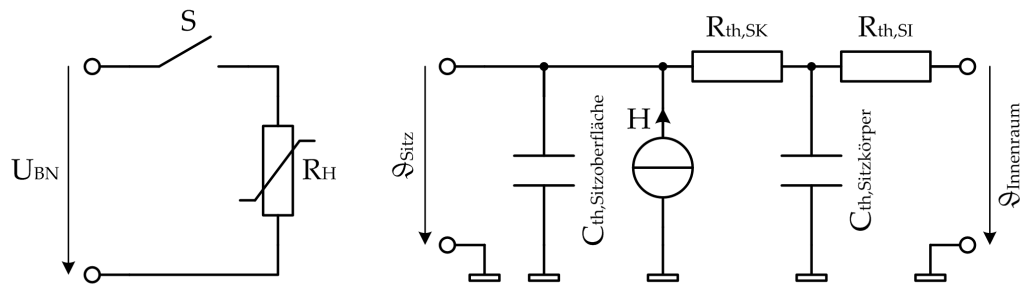


Abbildung 5.23: Ersatzschaltbild einer Sitzheizung (elektrisch und thermisch)

wird auf der thermischen Seite des Modells als Wärmestrom dargestellt, der den Sitz dementsprechend aufheizt. Der Sitz ist im Modell durch zwei Wärmekapazitäten abgebildet. Die Sitzoberfläche hat eine relativ kleine Wärmekapazität $C_{th, Sitzoberflaeche}$, die sich schnell aufheizt. Der restliche Sitz hat eine wesentlich größere Wärmekapazität $C_{th, Sitzkoerper}$ und wärmt sich über einen Wärmewiderstand $R_{th, SK}$ langsam auf. Gleichzeitig hat der Sitz über den Wärmewiderstand R_{SI} eine thermische Verbindung zum Innenraum. Durch diese Art der Modellierung wird zum einen der Wärmeübergang von den Heizelementen auf die Insassen, zum anderen aber auch der Wärmefluss von den Insassen auf die Sitze abgebildet. Bei geringen Anfangstemperaturen (z. B. im Winter) erwärmen die Insassen zunächst den Sitz, bevor sie von der Sitzheizung selbst erwärmt werden.

5.2.5 Sonstige Verbraucher

Neben den bereits vorgestellten Komponenten sind im Fahrzeug noch viele weitere verbaut, die jedoch nur eine geringe Dynamik aufweisen. Ihr Verhalten kann daher als ohmsch angenommen werden und durch einen einfachen Widerstand modelliert werden, siehe Abbildung 5.24. Diese Modellierung entspricht dem Detaillierungs-

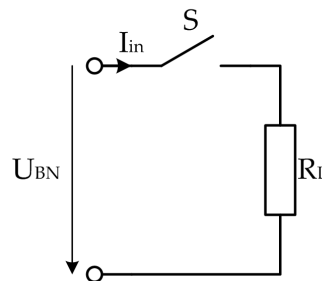


Abbildung 5.24: Ersatzschaltbild für einen ohmschen Verbraucher

grad I (siehe Tabelle 5.1). Der Lastwiderstand R_L wird für jede Komponente messtechnisch oder aus vorhandenen Daten über die Nennspannung ($U_{nenn} = 13,5 \text{ V}$) und die Nennleistung P_{nenn} bestimmt:

$$R_L = \frac{U_{nenn}^2}{P_{nenn}} \quad (5.32)$$

Mit einem Schalteingang kann der Schalter S geschlossen oder geöffnet werden und die Komponenten somit ein- bzw. ausgeschaltet werden. Für alle Komponenten wurde mindestens dieses rein ohmsche Modell in der Modellbibliothek hinterlegt.

5.2.6 Umfang der Modellbibliothek

Die entwickelte Modellbibliothek umfasst insgesamt 36 Komponenten für die zum Teil mehrere Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden erstellt wurden. Abschnitt 5.2.6 zeigt eine Übersicht der Komponentenmodelle.

5.3 Modellverifizierung

Nach der Modellierung der Bordnetzkomponenten müssen die Modelle verifiziert werden, d. h. ihr Verhalten muss mit dem der realen Komponenten verglichen werden. Zusätzlich muss das Gesamtmodell, das aus den Einzelmodellen passend für ein bestimmtes Fahrzeug zusammengesetzt wird, verifiziert werden.

5.3.1 Verifizierung der Komponentenmodelle

Die erstellten Komponentenmodelle lassen sich für die Verifizierung in drei Gruppen einteilen:

- kennlinienbasierte Modelle
- ohmsche Modelle (siehe Abschnitt 5.2.5)
- Strukturmodelle

Da die kennlinienbasierten und die ohmschen Modelle bereits Daten enthalten, die an den jeweiligen Komponenten gemessen wurden (siehe Kapitel 4), müssen diese nicht nachträglich verifiziert werden. Nur die Strukturmodelle müssen entsprechend überprüft werden. Dazu wurden Simulationen durchgeführt und mit Messungen an den realen Komponenten verglichen. Beipielhaft soll dies an den Modellen der Sitzheizung und der Unterdruckpumpe dargestellt werden.

Komponente	modellierte Detaillierungsgrade
<i>Quellen, Speicher und Wandler</i>	
Generator	I,II
Bordnetzbatterie	II
Bordnetzwandler	I,II
<i>Sicherheitssysteme</i>	
Abblendlicht	I
Fernlicht	I
Standlicht	I
Wischwasserpumpe	I
Wischermotor	I
Bremslicht	I
Nebelschlusslicht	I
Blinklicht	I
Rückfahrlicht	I
Parklicht	I
Signalhorn	I
Scheibenheizung	I, III
Bremsanlage	I, II
Lenkung	I,II
<i>Komfortsysteme</i>	
Innenraumlüfter	I, II
Sitzheizung	I,III
Fensterheber	I
Außenspiegelheizung	I
Nebelscheinwerfer	I
Innenraumlicht	I
Außenspiegelverstellung	I
Scheinwerferreinigung	I
Schiebedach	I
Waschdüsenheizung	I
<i>Infotainmentsysteme</i>	
Radio	I
Navigationssystem	I
Soundsystem	I
<i>Kühlsysteme</i>	
Kühlmittelpumpe	I, II
Kühlerlüfter	I, II
Batterielüfter	I, II
<i>Fahrzeugthermodynamik</i>	
Insasse	III
Fahrzeuginnenraum	III
Fahrzeugumgebung	III

Tabelle 5.4: Übersicht der Komponentenmodelle

5.3.1.1 Verifizierung des Sitzheizungsmodells

In Abbildung 5.25 ist der Temperaturverlauf auf einem Sitz mit eingeschalteter Sitzheizung dargestellt. Die Messung wurde in einer Klimakammer bei -10 °C durchgeführt. Das Verhalten des Sitzheizungsmodells wurde an diese Messung angepasst,

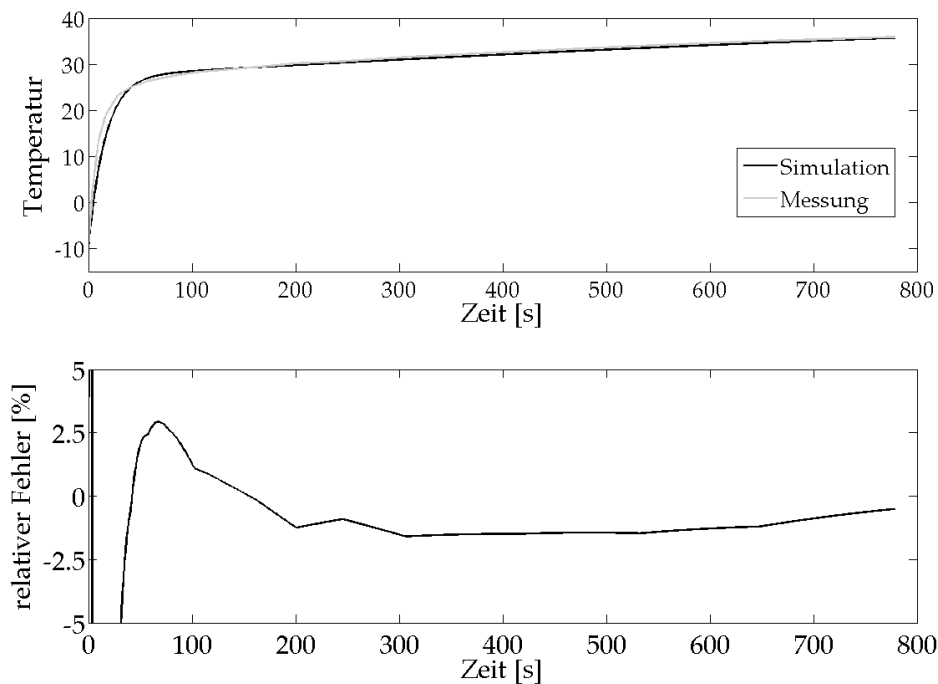


Abbildung 5.25: Temperaturverlauf der Sitzheizung bei voller Heizleistung (Simulation, Messung und relativer Fehler)

indem die Werte für die Wärmekapazitäten und Wärmewiderstände entsprechend korrigiert wurden. Die Darstellung des relativen Fehlers zeigt ab ca. 50 s Werte von ca. $\pm 2,5\%$. Nur zu Beginn der Simulation weichen die simulierten Werte deutlich von der Messung ab. Da allerdings während der Aufheizphase die Sitzheizung mit voller Leistung arbeitet und das Regelsystem erst im Bereich um 30 °C beginnt, die Heizleistung zu verringern, hat diese Abweichung keinen Einfluss auf das elektrische Verhalten. Die Fehler-Werte zu Anfang wurden daher zur besseren Ansicht nicht dargestellt.

5.3.1.2 Verifizierung des Unterdruckpumpenmodells

Bei der Parametrierung des Modells der Unterdruckpumpe besteht die Schwierigkeit, dass die Aktivierung der Pumpe stark vom Bremsverhalten des Fahrers abhän-

gig ist, siehe auch Abschnitt 4.3.2.2. Daher kann kein allgemein gültiger Parametersatz bestimmt werden. Wenn die Unterdruckpumpe bei der Simulation berücksichtigt werden soll, so muss das Modell entweder mit Durchschnittswerten parametrisiert werden, die aus Messfahrten ermittelt wurden, oder auf eine bestimmte Messfahrt abgeglichen werden. In Abbildung 5.26 ist dies dargestellt. Dazu wurde auf einem

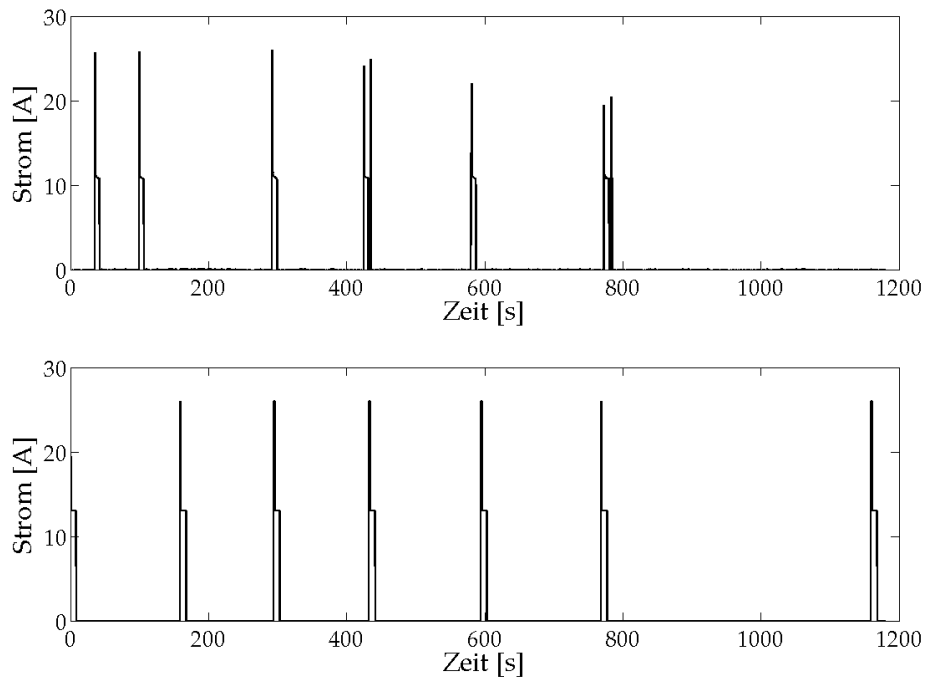


Abbildung 5.26: Stromaufnahme der Unterdruckpumpe im ECE-Zyklus (oben Messung, unten Simulation)

Rollenprüfstand der NEDC-Fahrzyklus gefahren und die Stromaufnahme der Unterdruckpumpe aufgenommen. Die Modellparameter wurden anschließend so angepasst, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung ergibt. Teilweise kommt es jedoch zu Abweichungen, weil im Modell von einem statischen Fahrerverhalten ausgegangen wird, d. h. es wird angenommen, dass der Fahrer immer mit konstantem Bremsdruck bremst. Dies ist in der Realität nicht der Fall. Auch die Höhe der Strom-Peaks ist in der Realität nicht immer gleich. Dieses Verhalten lässt sich jedoch nicht mit vertretbarem Aufwand im Modell abbilden. Daher wird hier immer der gleiche Wert angesetzt und eine entsprechende Abweichung zwischen Messung und Simulation akzeptiert.

5.3.2 Verifizierung des Gesamtmodells

Sehr wichtig für Aussagen zur Güte der Modelle ist die Verifizierung des Gesamtmodells, da dieses z. B. für die Auslegung der Energieversorgung im Kfz genutzt werden soll. Dazu wurden die in Abschnitt 4.3.2.2 gewonnenen Daten mit den Simulationsergebnissen verglichen.

In Abbildung 5.27 ist der gemessene und der simulierte Bordnetzleistungsverlauf für den Stadtzyklus bei 27 °C Außentemperatur dargestellt. Die Leistungsspitzen in der

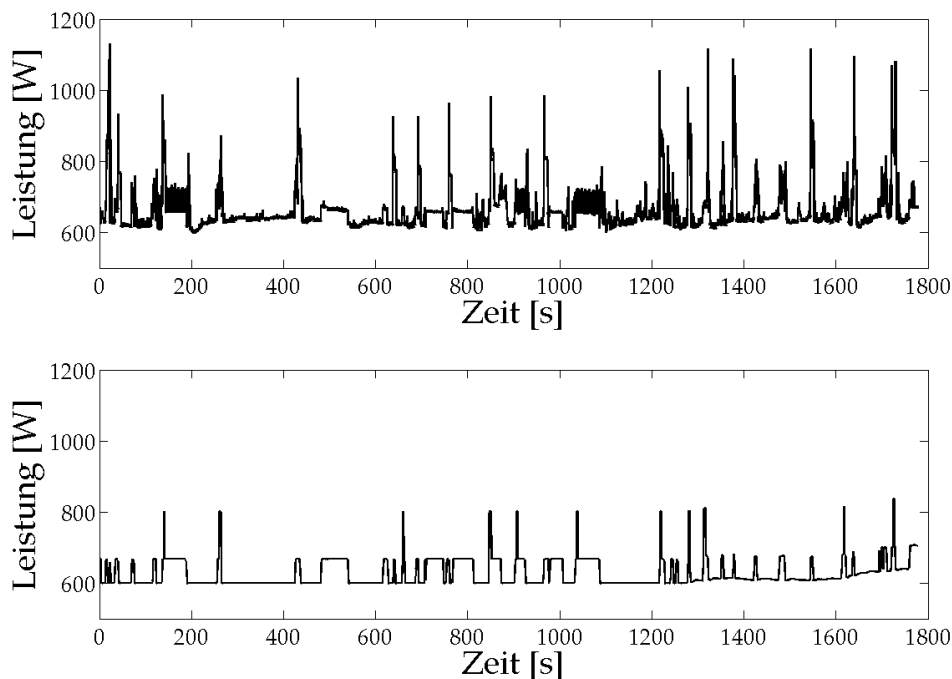


Abbildung 5.27: Bordnetzleistung im Stadtzyklus bei 27 °C (oben Messung, unten Simulation)

Messung stammen von der Unterdruckpumpe und der elektromechanischen Lenkung. Wie bereits in Abschnitt 5.2.3 erwähnt, wurde die Dynamik der Lenkung nicht in der Simulation abgebildet und somit fehlen deren Leistungsspitzen. Die Leistungsspitzen der Unterdruckpumpe sind in der Simulation zwar vorhanden, korrelieren allerdings zeitlich nicht vollständig mit denen in der Messung. Dieses Verhalten wurde bereits in Abschnitt 5.3.1.2 beschrieben. Aufgrund der über den Zyklus gemittelten Leistung von nur wenigen Watt hat dies auf die Energiebilanz keinen signifikanten Einfluss.

Auch das Verhalten der Blinker und der Bremslichter weicht in der Simulation von dem in der Messung ab. Die Blinker wurden in der Simulation nicht berücksichtigt, da nur die Längsdynamik des Fahrzeugs simuliert wird und keine Informationen über die Lenkbewegungen vorliegen. Im Mittel ist die Leistung der Blinker mit ca. 4 W allerdings sehr gering. Die Aktivierung der Bremslichter erfolgt in der Simulation ähnlich wie die der Unterdruckpumpe und unterliegt daher auch einem gewissen Fehler, der sich in der Simulation als ein erhöhter Leistungsbedarf von ca. 25 W dieser Komponenten auswirkt.

In Tabelle 5.5 sind die mittleren Leistungen \bar{P} und die Abweichungen $\Delta\bar{P}$ im Stadtzyklus dargestellt. Die Simulation ergibt eine um 36 W geringere mittlere Leistung als

	\bar{P}	$\Delta\bar{P}_{\text{bereinigt}}$		\bar{P}	$\Delta\bar{P}_{\text{bereinigt}}$	
	[W]	[W]	[%]	[W]	[W]	[%]
Messung	661	-36	-5,4 %	661	-57	-8,6 %
Simulation	625			604		

Tabelle 5.5: Auswertung der Messfahrt im Stadtzyklus bei 27 °C

die Messung. Nach Berücksichtigung der Abweichungen durch Blinker, Bremslicht und Unterdruckpumpe steigt diese Abweichung auf 57 W bzw. 8,6 % ($\Delta\bar{P}_{\text{bereinigt}}$). Der Grund für diese hohe Abweichung ist in der Simulation des Kühlsystems zu finden. Im realen Fahrzeug ist der Kühlerlüfter nicht nur für die Kühlung des Elektromotors und der Leistungselektronik zuständig, sondern dient zusätzlich zur Kühlung des Innenraums in Verbindung mit der elektrischen Klimaanlage. Diese Abhängigkeit wurde in der Simulation nicht abgebildet, da die Klimaanlage als Hochspannungskomponente nicht modelliert wurde. Der zusätzliche Kühlbedarf wird daher in der Simulation nicht berücksichtigt und dementsprechend wird der Kühlerlüfter mit einer geringeren Leistung angesteuert. Um diesen Fehler zu vermeiden, muss ein Modell der Klimatisierung in das Fahrzeugmodell integriert werden. Dies war im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht möglich.

Bei einer Außentemperatur von 7 °C tritt das Problem des fehlenden Klimatisierungsmodells nicht auf, da diese bei den entsprechenden Temperaturen nicht aktiviert ist. Stattdessen sind die Heizsysteme aktiviert. Abbildung 5.28 zeigt den gemessenen und den simulierten Bordnetzleistungsverlauf für den Betrieb im Stadtzyklus bei 7 °C.

Durch die aktivierten Heizsysteme, die getaktet betrieben werden, ist das Signal dynamischer als bei 27 °C. Die Abweichungen durch Blinker und, Bremslicht und Unterdruckpumpe sind hier ebenfalls vorhanden. Da die Modell der Heizsysteme sehr

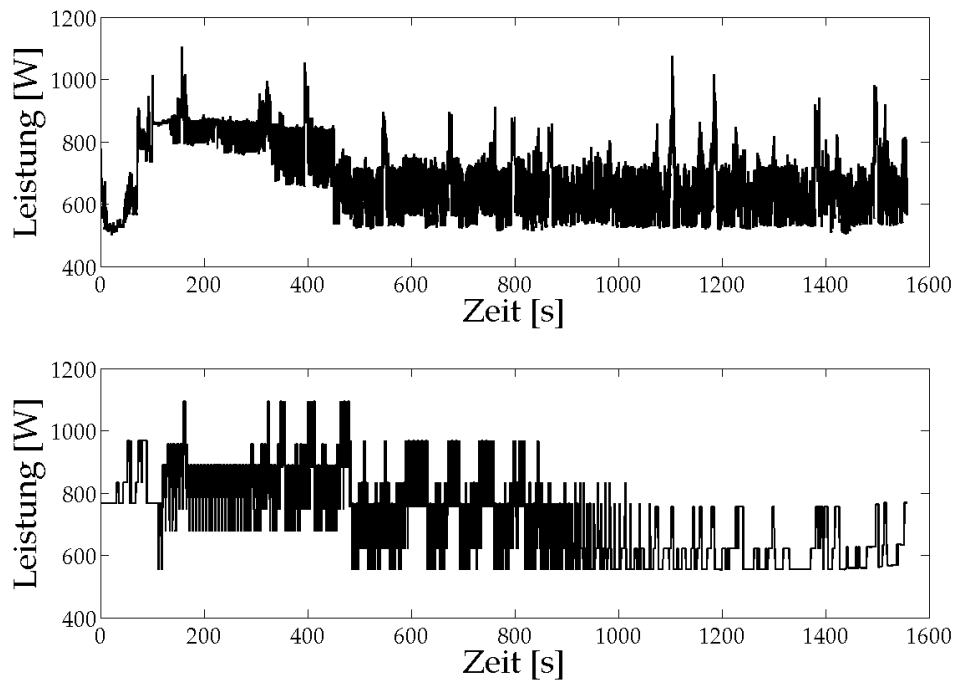


Abbildung 5.28: Bordnetzleistung im Stadtzyklus bei 7 °C (oben Messung, unten Simulation)

	\bar{P}	$\Delta \bar{P}_{bereinigt}$		\bar{P}	$\Delta \bar{P}_{bereinigt}$	
	[W]	[W]	[%]	[W]	[W]	[%]
Messung	674	29	4,3 %	674	8	1,2 %
Simulation	703			682		

Tabelle 5.6: Auswertung der Messfahrten im Stadtzyklus bei 7 °C

gut mit der Realität übereinstimmen, ergeben sich im Herbstbetrieb allerdings wesentlich geringere Abweichungen zwischen Messung und Simulation, wie in Tabelle 5.6 dargestellt ist. Es ergibt sich eine Abweichung von +29 W in der Simulation. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Blinkerleistung ergibt sich eine bereinigte Abweichung $\Delta \bar{P}_{\text{bereinigt}}$ von 8 W, bzw. 1,2 %.

5.4 Fazit

Die Verifizierung des Gesamtmodells hat ergeben, dass Aussagen über die Leistungsspitzen, die von der Unterdruckpumpe und elektromechanischen Lenkung hervorgerufen werden, mit den in dieser Arbeit entwickelten Modellen nicht getroffen werden können. Dazu wäre eine detailliertere Modellierung dieser Komponenten notwendig.

Die Güte der anderen Einzelmodelle ist jedoch sehr gut, weil sie direkt auf Messdaten beruhen. Dies gilt speziell für die Modelle des Detaillierungsgrades I. Die Freiheitsgrade der detaillierteren Modelle, z. B. das Sitzheizungsmodell oder das Heckscheibenheizungsmodell, wurden entsprechend der Messdaten parametrisiert. Dadurch ergibt sich auch bei diesen Modell eine entsprechend hohe Genauigkeit, auch im zeitlichen Verhalten. Somit können Aussagen über das zeitliche und das energetische Verhalten der Bordnetzverbraucher gemacht werden.

6 Dimensionierungsmethodik für die Kfz-Bordnetzversorgung (L/S)

Für eine sichere und zuverlässige Energieversorgung des 14 V Bordnetzes ist eine ausreichende Dimensionierung der Quellen, Wandler und Speicher erforderlich. Die bei der Dimensionierung auftretenden Zielkonflikte müssen dabei erkannt und minimiert werden. Diese resultieren vorwiegend aus der Tatsache, dass auf der einen Seite aufgrund des Kostendrucks, des Bauraummangels und des Gewichtes und damit die maximal zur Verfügung stehende Leistung der Energieversorgungskomponenten begrenzt ist und auf der anderen Seite durch eine stetige Erhöhung des Ausstattungsgrades an Komfort- und Sicherheitssystemen der Leistungsbedarf im Bordnetz, wie in Abschnitt 4.3 erläutert, stark zunimmt.

In Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben wird durch den Klauenpolgenerator aufgrund seiner konstruktiven Eigenschaften die maximale Leistungsabgabe begrenzt. Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren das 42 V Bordnetz als Lösung für dieses Problem diskutiert. Eine Umstellung hat sich aber bisher nicht durchsetzen können. Stattdessen wurden Steuerungsalgorithmen für das Bordnetz entwickelt, die in Abhängigkeit vom Batteriezustand während des Fahrzeugbetriebs und -stillstands Schaltmaßnahmen an den elektrischen Verbrauchern durchführen, um die Defizite durch die geringere Generatorleistung weitestgehend auszugleichen. Durch die Einführung hybrider Antriebskonzepte wird neben der 14 V Bordnetzspannung eine vom Hybridisierungsgrad abhängige höhere Spannungsebene eingeführt. Bei der Dimensionierung der Energieversorgung für das Bordnetz liegt das Augenmerk hierbei auf der optimalen Spezifizierung des zwischen den beiden Spannungsebenen verbauten DC/DC-Wandlers, weil die zu übertragende Leistung unter anderem mit dem Bauteilaufwand gekoppelt ist.

In den nächsten Kapiteln wird eine Dimensionierungsmethodik spezifiziert, die es erlaubt, die optimale Energieversorgung für das Bordnetz sowohl in Fahrzeugen mit konventionellen als auch mit alternativen Antrieben zu bestimmen. Des Weiteren werden mehrere Steuerungsalgorithmen vorgestellt, die in der Auslegung der Energieversorgung berücksichtigt werden. Daran anschließend wird die Umsetzung der Dimensionierungsmethodik in eine Software und deren Einbindung in eine Simulationsumgebung dargestellt. Die Anwendbarkeit der hieraus resultierenden Toolkette

wird abschließend anhand eines Auslegungsbeispiels für die Bordnetzenergieversorgung in einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb gezeigt.

6.1 Methodik (L)

Die im Folgenden vorgestellte Dimensionierungsmethodik umfasst eine allgemeine Vorgehensweise bei der Auslegung der Energieversorgungskomponenten für das 14 V Bordnetz in Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben. Die auszulegenden Komponenten der Energieversorgung sind in einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb der Klauenpolgenerator und die Batterie. Dagegen sind es bei alternativen Antriebskonzepten der DC/DC-Wandler und die 14 V Batterie. Die Elektromaschine und die Traktionsbatterie werden hierbei nicht berücksichtigt, weil diese auf die Antriebsanforderungen ausgelegt werden, die ein Vielfaches höher als die Verbraucherleistungen im Bordnetz sind.

Abbildung 6.1 zeigt den grundsätzlichen Ablauf für die Dimensionierung der Energieversorgung. Dabei wird ausgehend von den Fahrzeuginformationen aus einer Modellbibliothek ein Modell für das Bordnetz mit vorgegebener Modellierungstiefe erstellt, das mit verschiedenen Betriebsszenarien und gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Steuerungsalgorithmen simuliert wird. Diese Simulationen interagieren mit einem Optimierungsverfahren, welches in Abhängigkeit der Zielfunktion und den Randbedingungen die Modellparameter der zu optimierenden Energieversorgungskomponenten verändert. Sind die optimalen Auslegungswerte für die Energieversorgung gefunden, werden diese in eine Datei übertragen, die hier als „elektronisches Lastenheft“ bezeichnet wird.

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über die Optimierung und ein hierfür geeignetes Verfahren vorgestellt. Des Weiteren werden die zu berücksichtigenden Randbedingungen kurz erläutert und die notwendigen Betriebsszenarien für Fahrzeuge mit konventionellen und alternativen Antrieben abgeleitet.

6.2 Optimierung (L)

Um die bestmöglichen Parameter der Energieversorgungskomponenten unter Berücksichtigung der Randbedingungen für das Bordnetz zu finden, ist das Aufstellen einer Gütefunktion notwendig. Diese gibt dabei ein Gütemaß in Abhängigkeit der zu optimierenden Parameter wieder. Abbildung 6.2 zeigt exemplarisch einen beliebig angenommenen Güteverlauf in Abhängigkeit von der Batteriekapazität und dem Ausgangsstrom des DC/DC-Wandlers. Der Güteverlauf kann einerseits analytisch

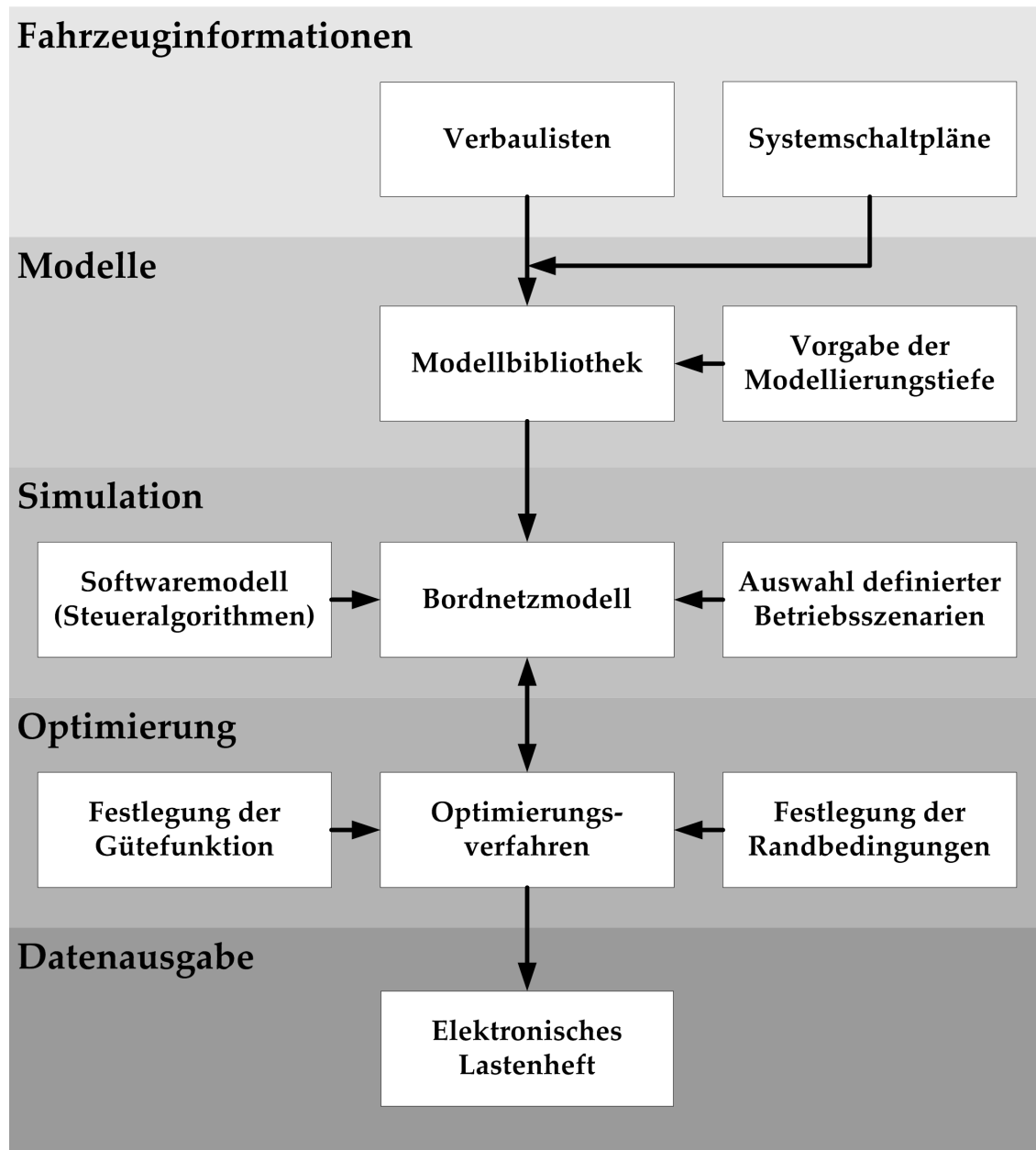


Abbildung 6.1: Allgemeine Methodik für die Dimensionierung der Energieversorgung des Bordnetzes

und andererseits durch diskrete Bewertungspunkte und einer darauf angewendeten Interpolation beschrieben werden.

Als Bewertungsgrundlage für die zu optimierenden Parameter können unterschiedliche Kriterien wie z. B. Kosten, Bauraum, Gewicht, etc. herangezogen werden. Da diese Kriterien zwischen den Automobilherstellern verschieden gewichtet werden können, wird hier kein festes Gütemaß, sondern ein frei parametrierbares Modell für eine mehrdimensionale Zielfunktion erforderlich sein.

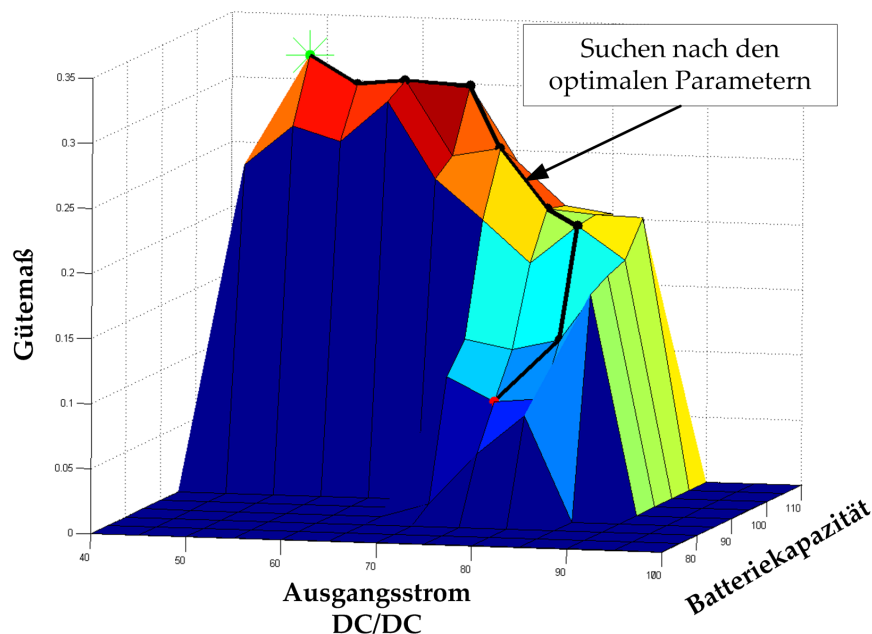


Abbildung 6.2: Exemplarische Gütefunktion für die Bestimmung der optimalen Parameter eines DC/DC-Wandlers und der 14V Batterie

Um für diesen Anwendungsfall innerhalb eines mehrdimensionalen Suchraums die optimalen Parameter zu finden, hat sich basierend auf der in Abschnitt 2.4 durchgeführten Evaluierung verschiedener Optimierungsverfahren der Metropolis-Algorithmus als ein geeignetes Verfahren herausgestellt.

6.2.1 Metropolis-Algorithmus

Der im Jahr 1953 vorgestellte Metropolis-Algorithmus basiert auf dem Hill-Climbing Verfahren. Zu dem Hill-Climbing-Verfahren gehören eine Vielzahl an Suchmethoden, die zur Lösung von Optimierungsverfahren eingesetzt werden, bei denen sowohl die Variablen als auch die Zielfunktionen skalare Größen sind. Das Konzept dieses

heuristischen Optimierungsverfahrens ist, ausgehend von einer zufälligen Lösung in einem Suchraum einen zufällig ausgewählten Nachbarn aufzusuchen. Ist die neue Lösung besser als die vorhergehende, dann wird diese beibehalten. Andernfalls wird ein anderer Nachbar der vorherigen Lösung besucht und bewertet. Dieser Suchvorgang wird solange wiederholt, bis es keine bessere Nachbarlösung mehr gibt oder ein zuvor definiertes Gütemaß erreicht ist. Die Nachteile des Hill-Climbing-Algorithmus sind hierbei das langsame Suchschema und die Gefahr des Steckenbleibens im lokalen Optimum.

Im Gegensatz zum Hill-Climbing arbeitet der Metropolis-Algorithmus stochastisch, wodurch dieser auch entgegen der Richtung eines Optimums suchen kann. Das Verfahren hat seinen physikalischen Hintergrund im Verhalten einzelner Teilchen in einer Schmelze. Dabei nehmen die Teilchen nicht immer die energetisch optimale Position in ihrer Umgebung ein, sondern können sich aufgrund der Umgebungstemperatur T auch vom Energieniveau her verschlechtern. Dies geschieht mit der Wahrscheinlichkeit:

$$p = e^{\left(\frac{-\Delta E}{k_B \cdot T}\right)} \quad (6.1)$$

ΔE ist hier die Differenz zwischen angestrebtem und altem Energiezustand. k_B steht für die Boltzmann-Konstante, die eine fundamentale Umrechnungskonstante zwischen Temperaturen und thermischen Energien darstellt.

Im Vergleich zum Hill-Climbing-Verfahren ändert sich der Algorithmus wie folgt, wobei x der aktuelle Ort im Suchraum $f: S \rightarrow R$ sei und y ein Nachbar von x , der als nächster aktueller Ort in Frage kommt:

1. Berechne $f(x)$ und $f(y)$
2. Bei einer Minimierung der Zielfunktion wird y als neuer Ort akzeptiert, wenn $f(y) \leq f(x)$; bei einer Maximierung entsprechend $f(y) \geq f(x)$
3. Ist die Bedingung in 2. nicht erfüllt, dann wird $f(y)$ als neuer Ort akzeptiert, wenn eine ermittelte Zufallszahl zwischen 0 und 1 kleiner als die Wahrscheinlichkeit p ist

Durch diese Vorgehensweise besteht die Möglichkeit, lokale Optima mit einer Wahrscheinlichkeit größer Null wieder zu verlassen, um das globale Optimum im Suchraum zu finden. Es kann in einigen Fällen sinnvoll sein, den Metropolis-Algorithmus mit einer hohen Temperatur T zu starten, um einen großen Bereich des Suchraums zu durchlaufen und im Folgenden die Temperatur T zu senken, damit die Wahrscheinlichkeit zum Finden eines Optimums steigt. Ein Metropolis-Algorithmus, bei dem die Temperatur innerhalb der Simulationszeit geändert wird, bezeichnet man auch als Simulated Annealing (Simuliertes Abkühlen). Die Umsetzung und Anwendung des hier vorgestellten Optimierungsalgorithmus wird in Abschnitt 6.4.9 genauer erläutert.

6.2.2 Randbedingungen

Um aus der Optimierung Parameter für eine sichere und zuverlässige Energieversorgung zu gewinnen, ist das Einhalten von harten Randbedingungen notwendig. Diese betreffen mit der Ladebilanz, Kaltstartfähigkeit, Zyklisierung, Batterieentladung im Ruhezustand und den Spannungsgrenzen vorwiegend die Batterie.

6.2.2.1 Ladebilanz

Die Ladebilanz liefert eine Aussage über die Restkapazität in der Batterie nach einem Fahrzyklus mit einem entsprechenden Bordnetzverbrauch. Abbildung 6.3 zeigt die Berechnungsvorschrift der Ladebilanz in einem Bordnetz bestehend aus einer Quelle, einem Speicher und Verbrauchern. Durch eine positive Ladebilanz wird sichergestellt, dass der Ladezustand der Batterie am Ende des Fahrzyklus nicht kleiner als der Anfangsladezustand ist und somit die Batterie auf weiteren Fahrten nicht kritisch entladen wird.

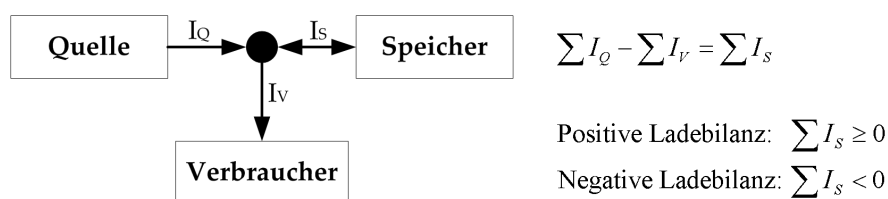


Abbildung 6.3: Bestimmung der Ladebilanz

6.2.2.2 Kaltstartfähigkeit

Das Drehmoment des Verbrennungsmotors und die erforderliche Startdrehzahl hängen unter anderem von der Temperatur ab. Mit sinkender Temperatur steigt die erforderliche Startdrehzahl und somit die notwendige Startleistung. Hinzu kommt, dass die aus der Batterie verfügbare Leistung auch mit sinkender Temperatur abnimmt. Aus diesem Grund ist für die Kaltstartfähigkeit des Fahrzeugs der in Abschnitt 4.2.3.1 eingeführte Kälteprüfstrom die maßgebliche Randbedingung für die Auswahl der Batteriegröße.

6.2.2.3 Zyklisierung

Unter der Zyklisierung ist hier das Verhältnis zwischen der Summe der Batterieentladung über die geforderte Batterielebensdauer und der Nennkapazität zu verstehen. Die gesamte Batterieentladung setzt sich dabei aus dem Vor- und Nachlaufbetrieb, dem Ruhezustand und dem Fahrbetrieb zusammen. Die Batterielebensdauer und die zugrunde gelegte Fahrbetriebszeit werden von den Automobilherstellern individuell vorgegeben. Aus der Entladung während der Batterielebensdauer und der für die einzusetzende Batterie maximalen Zyklisierung kann die erforderliche Mindestkapazität der Batterie bestimmt werden.

6.2.2.4 Batterieentladung im Ruhezustand

Zur Gewährleistung einer Mindeststandzeit ist eine Batteriegröße notwendig, die bei dem zu erwartenden maximalen Ruhestrom und Nachlaufbetrieb noch eine ausreichende Restkapazität besitzt. Hinzu kommt, dass die während der Standzeit auftretende Selbstentladung mit berücksichtigt werden muss. Die Bestimmung einer hieraus resultierenden Mindestbatteriegröße wird in Abschnitt 6.4.7 vorgestellt.

6.2.2.5 Spannungsgrenzen

Das Ändern der Betriebszustände der im Bordnetz verbauten Komponenten durch manuelle und automatische Schalthandlungen kann zu Spannungsänderungen führen. Es ist dabei die Aufgabe der Energieversorgung, die Spannung im Bordnetz nahezu konstant zu halten. Die zulässigen Spannungsabweichungen richten sich nach der internationalen Norm ISO/DIS 16750-2. [46] Es wird hier zwischen komfort- und funktionsrelevanten Abweichungen unterschieden. Bei den komfortrelevanten Abweichungen ist vorwiegend der Betriebsspannungsbereich der Glühlampen zu beachten, wobei das dadurch bedingte Auftreten des Lichtflackerns einerseits störend wirkt und andererseits die Lebensdauer der Glühlampe einschränkt.

Funktionsrelevante Abweichungen führen zu Betriebseinschränkungen von Komponenten bzw. Systemen. Falls die Spannungsgrenzen durch die Energieversorgung nicht eingehalten werden können, dann sind, wie in Abschnitt 4.1.6 beschrieben, die Stromsteilheiten durch zusätzliche Bauelemente im Versorgungszweig der entsprechenden Komponenten zu begrenzen. Alternativ können, wie später noch in Abschnitt 6.3.4 erläutert wird, durch Steuerungsalgorithmen das Auftreten von Leistungsspitzen im Bordnetz minimiert werden.

6.2.3 Betriebsszenarien

Bei der Dimensionierung der Energieversorgung des Bordnetzes ist neben der Erfassung der installierten elektrischen Verbraucher das Betriebsverhalten sowohl der Verbraucher als auch der Quellen zu berücksichtigen. Das Betriebsverhalten der Komponenten wird dabei, wie in Abschnitt 4.3.2 nachgewiesen, im Wesentlichen durch klimatische Umgebungsbedingungen, Fahrsituationen bzw. Fahrstrecken und dem Fahrerverhalten bestimmt. Außerdem kann das Komfortverhalten der weiteren Fahrzeuginsassen und die Tageszeit einen zusätzlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten einzelner Komponenten ausüben. Da aus Gründen der Simulationszeiten, worauf im Abschnitt 6.4.2.3 genauer eingegangen wird, nicht alle Betriebsvariationen durchgeführt werden können, müssen charakteristische Betriebsszenarien zugrunde gelegt werden. Um eine sichere Auslegungsbasis für die Energieversorgung zu liefern, müssen diese Betriebsszenarien für das Bordnetz hinsichtlich der Leistungsbereitstellung und des Leistungsverbrauchs eine „worst case“-Situation hervorrufen.

Ausgehend von den Erkenntnissen der Bordnetzanalyse werden ein von der Außentemperatur abhängiger Winter- ($T = -5\text{ °C}$), Herbst- ($T = +5\text{ °C}$) und Sommerbetrieb ($T = +40\text{ °C}$) für die Verbraucher definiert. Hieraus ergeben sich bestimmte Aktivierungsmuster der Komponenten bzw. Systeme der Funktionsbereiche Antrieb, Sicherheit, Komfort und Infotainment. Des Weiteren sind neben der Außentemperatur die Parameter Geschwindigkeit, Beschleunigung und die daraus resultierende Motortemperatur für das Betriebsverhalten der Komponenten des Funktionsbereichs Antrieb berücksichtigt. Der Herbstbetrieb mit der höchsten Leistungsanforderung wird als Grundlage für die Auslegung der Energieversorgung herangezogen.

Bei Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb und verbautem Klauenpolgenerator ist die Leistungsabgabe, wie in der Bordnetzanalyse gezeigt, abhängig von der Drehzahl des Generators und somit vom Antriebsmotor. Folglich muss hier für die Auslegung ein Geschwindigkeitszyklus zugrunde gelegt werden, der einen erhöhten Anteil an Stillstandphasen und eine geringe Durchschnittsgeschwindigkeit hat, wie z. B. der in Abbildung 6.4 dargestellte sich viermal wiederholende ECE-Geschwindigkeitszyklus. Damit können „worst case“-Situationen hinsichtlich einer minimalen Leistungsbereitstellung abgebildet werden.

Im Gegensatz zu konventionellen Antrieben übernimmt bei hybriden Antriebskonzepten die Elektromaschine zusätzlich zur Versorgung des Bordnetzes antriebsrelevante Funktionen wie beispielsweise Start/Stop und Rekuperation. Hieraus ergibt sich eine höher ausgelegte Elektromaschine, wodurch beim Generatorbetrieb eine weitaus höhere Leistungsverfügbarkeit für das Bordnetz gerade auch im unteren Drehzahlbereich gegeben ist. [103] Ein möglicher Leistungsmangel, der prinzipiell während der Stopp-Phase, des Boostens und des elektrischen Fahrens auftreten kann,

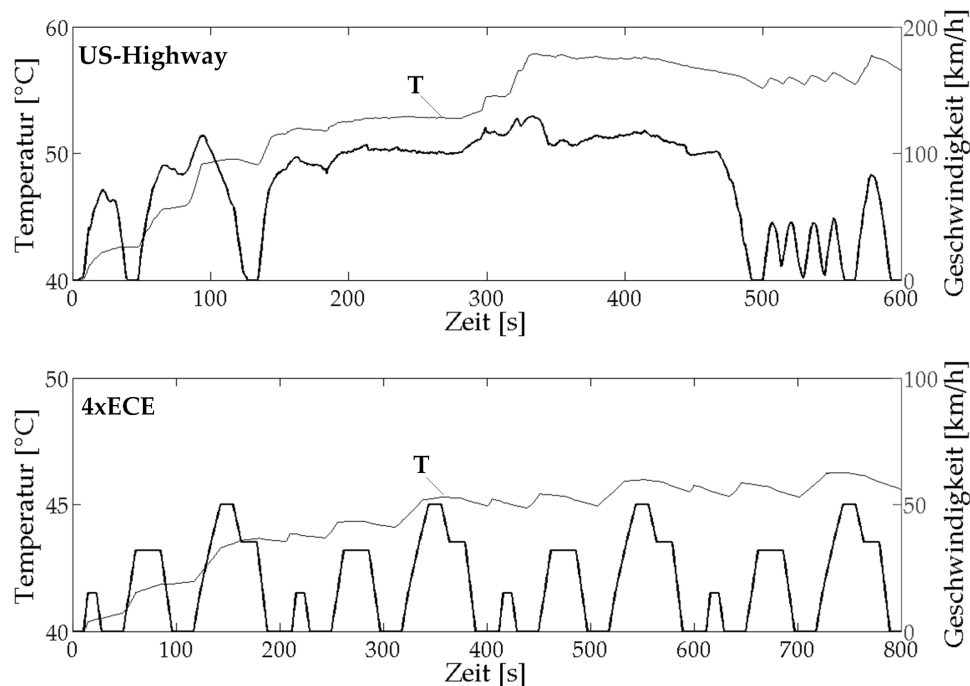


Abbildung 6.4: Geschwindigkeit und Motortemperatur (T) im US-Highway- und ECE-Zyklus bei einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb

wird durch die ebenso auf den Antrieb ausgelegte Traktionsbatterie abgefangen. Zukünftige Fahrzeuge mit APU oder mit Brennstoffzelle angetriebene Fahrzeuge werden grundsätzlich keinen Leistungsmangel für das Bordnetz aufweisen. Aus diesem Grund wird hier bei der Auslegung der Energieversorgungskomponenten für das Bordnetz in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben von einer geschwindigkeitsunabhängigen Leistungsbereitstellung für die 14 V Verbraucher ausgegangen.

Obwohl in einem Fahrzeug mit alternativem Antrieb die Fahrzeuggeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungsbereitstellung für das 14 V Bordnetz hat, erfordert die Auslegung trotzdem einen expliziten Geschwindigkeitszyklus. Der Grund hierfür liegt laut Bordnetzanalyse in der erhöhten installierten elektrischen Leistung der Kühlsysteme aufgrund des Elektromotors und der entsprechenden Leistungselektronik. Die von dem Kühlsystem abzuführende Verlustleistung korreliert mit der Antriebsleistung und somit mit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Folglich ist als Auslegungsbasis ein dynamischer Geschwindigkeitszyklus notwendig, der in Verbindung mit der Außentemperatur für die Leistungsaufnahme des Kühlsystems ein „worst case“ darstellt. Abbildung 6.4 zeigt den US-Highway Geschwindigkeitszyklus und die daraus resultierende Temperaturentwicklung am Motor im Vergleich zur Temperaturentwicklung während des viermal durchlaufenen ECE-Zyklus.

Tabelle 6.1 fasst die hier definierten Betriebsszenarien (BS) zur Auslegung der Bordnetzenergieversorgung für Fahrzeuge mit alternativen und konventionellen Antrieben zusammen.

Antrieb	BS 1		BS 2		BS 3	
	Klima	Fahrzyklus	Klima	Fahrzyklus	Klima	Fahrzyklus
Alternativ	Winter	US-Highway	Herbst	US-Highway	Sommer	US-Highway
Konventionell	Winter	ECE (4x)	Herbst	ECE (4x)	Sommer	ECE (4x)

Tabelle 6.1: Übersicht der Betriebsszenarien für die Auslegung der Bordnetzenergieversorgung

6.2.4 Fazit

Diese allgemein anwendbare Vorgehensweise erlaubt eine durchgängige Dimensionierung der Energieversorgung für das 14 V Bordnetz innerhalb eines virtuellen Entwicklungsprozesses. Neben der Modellbildung und Simulation ist der Einsatz eines geeigneten Optimierungsverfahrens wie dem Metropolis-Algorithmus ein wesentlicher Bestandteil dieser Auslegungsprozedur. Dabei sind die Gütefunktion, die Randbedingungen und die Betriebsszenarien nicht generell definierbar, da diese von den Automobilherstellern unterschiedlich festgelegt werden können.

In Abhängigkeit der Modellgüte und der verwendeten Modellierungstiefe kann eine Unsicherheit bei der Auslegung entstehen, die gegebenenfalls mit der Addition von Korrekturwerten auf die aus der Simulation gewonnenen Werte behoben wird. Des Weiteren werden hier bei der Dimensionierung ein unsachgemäßer Betrieb oder Fehlerfälle nicht berücksichtigt. Derartige Situationen müssen im realen Betrieb durch entsprechende Diagnosefunktionen abgefangen werden.

Die hier spezifizierte Dimensionierungsmethodik wurde im Rahmen dieser Arbeit in eine Toolkette umgesetzt. Des Weiteren sind innerhalb dieser Toolkette Steuerungsalgorithmen zu berücksichtigen, die eine Reduzierung der „worst-case“- Situationen für die Energieversorgung gewährleisten, falls die Energieversorgungskomponenten nicht auf den maximalen Leistungsbedarf des Bordnetzes ausgelegt werden können. Im folgenden Kapitel werden dazu heute im Bordnetz eingesetzte Batteriediagnosesysteme und darauf basierende Steuerungsalgorithmen vorgestellt.

6.3 Steuerungsalgorithmen für das Kfz-Bordnetz (L)

Derzeitige Steuerungssysteme in Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb sind dafür verantwortlich, dass die Batterie immer einen Mindestladezustand besitzt, damit die Wiederstartfähigkeit des Fahrzeugs bzw. eine zuverlässige Energieversorgung für die Sicherheitssysteme gewährleistet ist. Dabei sollen den Fahrzeuginsassen sämtliche elektrische Komfort- und Infotainmentfunktionen sowohl im Stand als auch im Fahrbetrieb möglichst lange zur Verfügung stehen. Die Ursachen für entladene Batterien sind beispielsweise:

- Ladebilanzdefizite
- Energieverbrauch durch Ruhestrom
- Defekte elektrische Verbraucher
- Physikalische und chemische Einflussgrößen (Temperatur, Säuredichte ...)

Die Steuerungssysteme werden als Softwaremodule in bestehende Steuergeräte wie das Bordnetzsteuergerät oder in Zusatzsteuergeräten implementiert. Diese können nach ihren Aufgaben in Batteriediagnose, Ruhestrommanagement und dynamisches Lastmanagement aufgeteilt werden.

6.3.1 Batteriediagnose

Unter Batteriediagnose versteht man einerseits die Bestimmung des aktuellen Zustands der Batterie und andererseits Informationen über das zukünftig zu erwartende elektrische Verhalten. Von der Vielzahl der Batteriezustände sind für die übergeordneten Steuerungsalgorithmen Werte wie der Ladezustand, die verfügbare Kapazität, die optimale Ladespannung, der Innenwiderstand und die Kalt- bzw. Warmstartfähigkeit relevant. Für die Zustandserkennung wurden in [63] verschiedene indirekte und direkte Messgrößen untersucht und bewertet:

- Messung der Klemmenspannung
- Energiebilanzierung über Strommessung
- Messung der Säuredichte

Für die Batteriediagnose sind aufbauend auf den Messgrößen Algorithmen notwendig, die eine schnelle Bewertung des Zustands der Batterie durchführen können.

Die Entwicklung eines Gesamtmodells der Batterie erfordert aufgrund dessen hohen nichtlinearen und stark temperaturabhängigen Verhaltens einen erheblichen Entwicklungsaufwand und viel Rechen- und Speicherressourcen. Weiterhin ist die Parametrierung des Modells sehr schwer durchzuführen. Ein probates Mittel stellt ein modular aufgebautes Modell dar, dessen Teilmodelle das Verhalten der Batterie in verschiedenen Betriebsphasen ausreichend beschreiben. Die Betriebsphasen umfassen den Ruhezustand, den Startvorgang und das Laden und Entladen der Batterie während des Fahrbetriebs. Aus den Resultaten der Teilmodelle wird der Batteriezustand abgeleitet und dem übergeordneten Steuerungssystem mitgeteilt. [63]

Der Innenwiderstand der Batterie ist bei gegebener Temperatur ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Batterie. Über die Strom- und Spannungsänderungen während der Startphase des Fahrzeugs kann der Innenwiderstand bestimmt werden. Eine alternative Methode zur Bestimmung des Innenwiderstands ist die Impedanzspektroskopie. Die Grundlage hierfür ist die Mikrozyklisierung um einen Betriebspunkt der Batterie und die Bestimmung der komplexen Impedanz in verschiedenen Frequenzbereichen. [63]

Der Batterieladezustand kann aus der Integration der Lade- und Entladeströme während des Fahrzeugbetriebs ermittelt werden, wenn parasitäre Effekte wie z. B. Gasung vernachlässigt werden können. Falls derartige Nebenreaktionen berücksichtigt werden müssen, so steht der Ladestrom nicht vollständig für den Ladevorgang der Batterie zur Verfügung und der berechnete Ladezustand unterliegt einem größer werdenden Fehler. Um diesen Fehler zu minimieren, kann durch Verlustfaktoren für die parasitären Effekte die Ladebilanz korrigiert werden. Im Ruhezustand ist eine Abschätzung des Ladezustandes über die Batteriespannung möglich. Aufgrund von Ruheströmen, Säureschichtung und Alterungseinflüssen können hier erhebliche Fehler bei der Ermittlung des Ladezustandes auftreten. Die Kompensation der Ruheströme vorwiegend bei tiefen Temperaturen und eine Bewertung der Säureschichtung sind Maßnahmen zur Reduzierung des Fehlers.

Anhand der elektrochemischen Batteriemodelle sowie der Kenntnis über den Grad der aktuellen Alterung können Aussagen über das zukünftige Verhalten der Batterie getroffen werden. Hierzu werden in [25] verschiedene Prädiktoren wie der Ladungs-, Spannungs- und Lebensdauerprädiktor vorgestellt. Solche Prädiktoren ermöglichen beispielsweise kritische Spannungsabfälle durch Aktivierung von Hochleistungsverbrauchern vorherzusagen und entsprechende vorsteuernde Maßnahmen wie z. B. eine Drehzahlerhöhung des Generators einzuleiten. Bei Start/Stopp-Anwendungen in Hybridfahrzeugen kann die Startfähigkeit nach einem definierten Fahrzeugstillstand bzw. die Ladungsreserve in der Stopp-Phase prognostiziert und der Betriebsstrategie mitgeteilt werden. Weiterhin sind mögliche Batterieausfälle frühzeitig erkennbar und somit ist das Liegenbleiben des Fahrzeugs durch einen vorzeitigen Batteriewechsel vermeidbar.

6.3.1.1 Batteriesensorik

Die Basis für eine genaue und zuverlässige Batteriezustandserkennung ist, wie oben erläutert, die Erfassung von Spannung, Strom und Temperatur. Die Batteriesensorik ist in der nach DIN 72311 genormten Polklemme integriert, so dass kein weiterer Bauraum notwendig ist. Abbildung 6.5 zeigt die Montage eines Batteriesensors der Firma Autokabel an einer Polklemme.

Dieser Batteriesensor wird an den Minuspol der Batterie angeschlossen und erfasst über einen $100\ \mu\Omega$ Messshunt den Strom. Der Strommessbereich liegt zwischen 0 und 1200 A bei einer Auflösung von 3 mA. Der relative Fehler ist dabei $< 0,5\%$. Die Spannung wird über einen Widerstandsteiler zwischen 6 V bis 60V mit einer Auflösung von 0,1 mV und einem relativen Fehler $< 0,2\%$ gemessen. Die innere Batterietemperatur wird anhand eines Temperaturmodells bestimmt, welches als Eingangsgröße die Temperatur am Minuspol verarbeitet. Das grundlegende Blockschaltbild des Batteriesensors ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

Der Batteriesensor besteht neben der Messwerterfassung aus weiteren Funktionsblöcken:

- Signalaufbereitung (u.a. 16-Bit AD-Wandler)
- Mikrocontroller
- Speicher (SRAM (bis 6 kB) und Flash (bis 128 kB))
- Oszillator, Wakeup-Timer und Watchdog
- Transceiver für LIN-Bus
- Spannungsregler

Die in diesem Kapitel vorgestellten Teilmodelle zur Batteriezustandserkennung und Prädiktion werden basierend auf den Messwerten Spannung, Strom und Temperatur und den im Speicher abgelegten Parametern und Kennlinien im Mikrocontroller durchgerechnet. Die aus den Modellen errechneten Zustandswerte werden über den LIN-Bus zu dem übergeordneten Steuerungssystem übertragen.

Zur Reduzierung des Ruhestromverbrauchs werden die Batteriegrößen nur zyklisch erfasst. Hierzu wird der Batteriesensor in einen Sleep-Modus versetzt und durch den Wakeup-Timer nach einer einstellbaren Dauer von 1 s bis 1 h regelmäßig aktiviert. Durch eine programmierbare Stromgrenzenüberwachung können auch im Sleep-Modus z. B. unvernetzte Verbraucher an der 12 V Steckdose oder fehlerhafte Komponenten detektiert werden. Nach einem Klemmenverlust wird ein Reset durchlaufen, bei dem die internen Parameter der Batteriediagnose auf ihre Anfangswerte zurückgesetzt werden, weil in diesem Fall von einem Batteriewechsel ausgegangen werden muss.

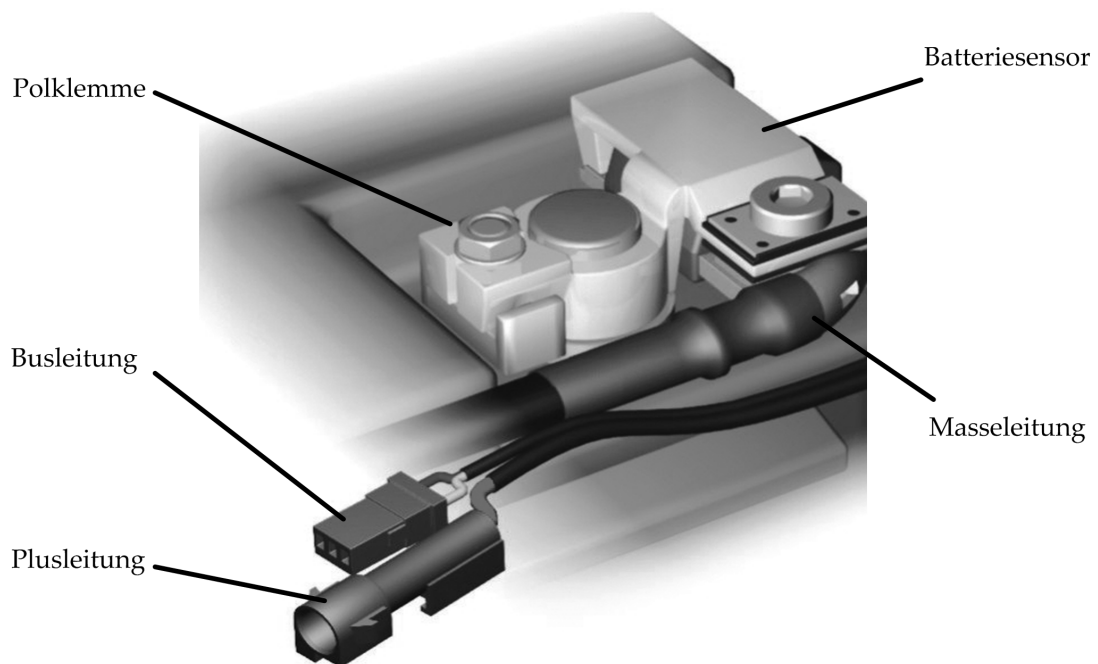


Abbildung 6.5: Montage eines Batteriesensors der Firma Autokabel

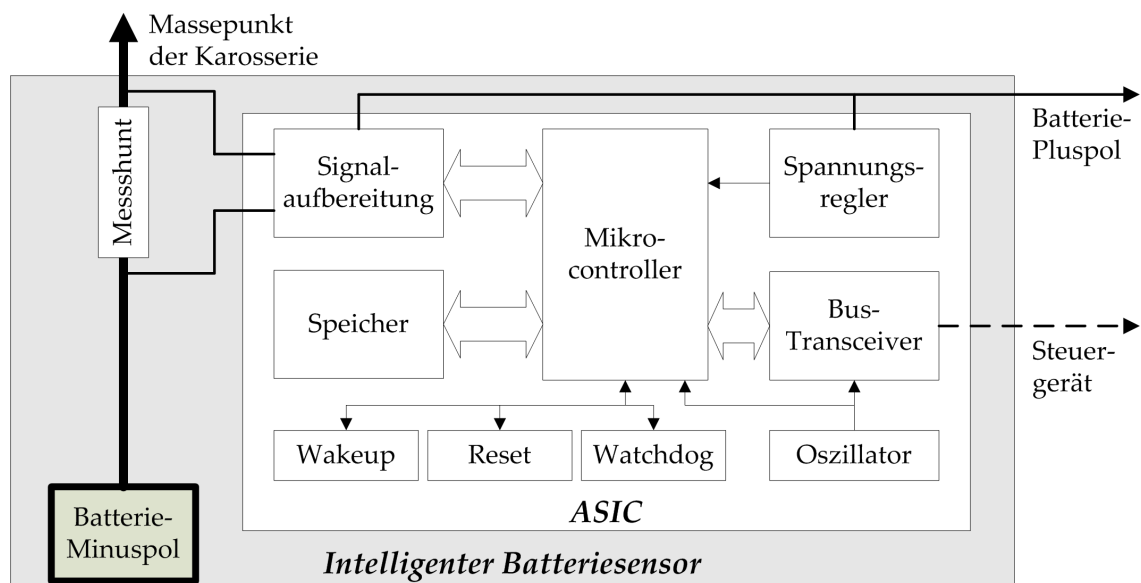


Abbildung 6.6: Aufbau eines Batteriesensors

Um eine höhere Systemgenauigkeit und eine weitere Miniaturisierung des Batteriesensors zu erreichen, wird ein ASIC für die oben genannten Funktionsblöcke eingesetzt. Durch dieses Sensorkonzept ist eine modulare Basis für ein übergeordnetes Steuerungssystem im Bordnetz unabhängig vom Fahrzeugtyp, vom elektrischen Ausstattungsgrad und von der Batteriegröße realisierbar.

6.3.2 Ruhestrommanagement

Die Aufgaben des Ruhestrommanagements sind, die Startfähigkeit des Fahrzeugs für längere Standzeiten zu gewährleisten und die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen. Hierzu werden die Daten aus der Batteriediagnose ausgewertet und die Anforderungen an die Verfügbarkeit von elektrischen Komponenten und an den Energieinhalt der Batterie abgewogen.

Falls die Batterie in einen kritischen Ladezustand kommt, werden die nach dem Fahrzeugbetrieb auftretenden Nachlauf- und Ruhestrome, wie in Abbildung 6.7 dargestellt, durch Funktionseinschränkungen (z. B. Übergang zum Taktbetrieb) bis hin zur priorisierten Abschaltung von Komfortverbrauchern, reduziert. Folglich ergibt sich mit jeder Abschaltung eine langsamere Entladung der Batterie. Dem Fahrer werden über das Kombiinstrument der Batteriezustand und die Abschaltmaßnahmen mitgeteilt. Es wird dabei dem Fahrer die Möglichkeit geboten, den Motor neu zu starten oder den betreffenden Verbraucher selbsttätig abzuschalten.

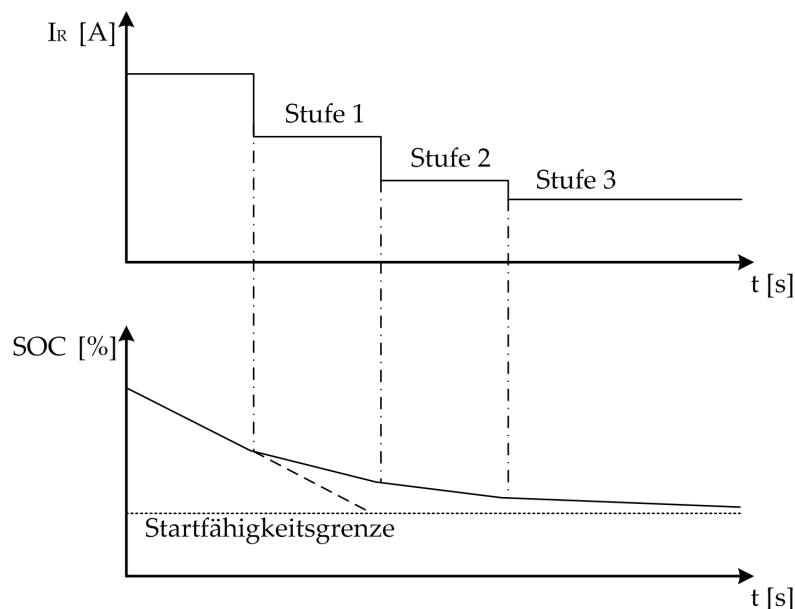


Abbildung 6.7: Abschaltstufen innerhalb des Ruhestrommanagements

Für die Bordnetzdiagnose wird eine Historiendatenbank angelegt, in der unter anderem folgende Einträge abgelegt werden:

- Ruhespannung und -strom
- Kritische Energiebilanz
- Energiebilanz der letzten Standzeiten
- Abschaltstufenhistorie
- Batteriewechselchronik

Die Ruhespannungen und -ströme werden immer dann in einer Historiendatenbank gespeichert, wenn die vom Automobilhersteller definierten Grenzwerte unter- bzw. überschritten werden, der CAN-Bus sich im Sleep-Modus befindet und Klemme 15 eine bestimmte Zeit deaktiviert ist.

Die Grenzwerte für die minimalen Batterieruhespannungen und den maximalen Ruhestrom werden vom Automobilhersteller individuell festgelegt. Unterschreitungen der Batterieruhespannung unter 12V sind besonders bei längeren Standzeiten kritisch, weil sich die Batterie in einem nicht regenerativen Zustand befindet und es somit zu Beschädigungen der Batterie kommen kann. Der Ruhestromgrenzwert setzt sich dabei aus dem zulässigen Ruhestrom und dem möglichen Laden des Alarmgebers der Diebstahlwarnanlage zusammen.

6.3.3 Dynamisches Lastmanagement

Zur Sicherstellung der Spannungsstabilität und einer positiven Ladebilanz im Bordnetz während des Fahrbetriebs wird mit einem dynamischen Lastmanagement in Abhängigkeit der Generatorauslastung und des Batteriezustandes die zur Verfügung stehende Leistung bedarfsgerecht an die Verbraucher verteilt. Das Lastmanagement umfasst dabei folgende Maßnahmen:

- Leistungsreduzierung relevanter Komponenten nach einer Prioritätenliste
- Intelligente Motorsteuerung und Generatorregelung

In kritischen Bordnetzsituationen wird über das Motorsteuergerät eine Anhebung der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors veranlasst, wodurch eine höhere Leistungsabgabe des Generators ermöglicht und somit negative Energiebilanzen über den Fahrzyklus vermieden werden. Des Weiteren kann neben der Leerlaufdrehzahlanhebung eine Verbraucherabschaltung oder eine Leistungsreduzierung der Verbraucher durchgeführt werden. Die Leistungsreduzierung erfolgt dabei pulsweitenmoduliert. Ein wichtiges Kriterium bei diesen Steuerungsmaßnahmen ist, dass einerseits keine sicherheitsrelevanten Komponenten beeinträchtigt und andererseits die

Insassen so wenig wie möglich davon durch Komforteinschränkungen bemerken. Hierfür wird eine Prioritätenliste erstellt, die besagt, in welcher Reihenfolge die relevanten Komponenten deaktiviert bzw. leistungsreduziert werden müssen. [9] Diese wird für die Komponenten anhand der Wahrnehmbarkeit durch die Insassen und der nötigen Sicherheitsrelevanz ermittelt. Hierbei kann unter Berücksichtigung verschiedener Parameter die Prioritätsstufe ausgewählter Komponenten variieren. Beispielsweise kann die Wahrnehmbarkeit einer Sitzheizung bei Sitzbelegung anders bewertet werden als bei keiner Sitzbelegung, wodurch andere Prioritäten entstehen können.

Um zu einer verbesserten Beurteilung des aktuellen Bordnetzzustandes zu gelangen und dadurch sporadisch auftretende Überbelastungen besser zu erkennen, wird die Häufigkeit und Dauer von belastenden Zuständen während des Fahrbetriebs in einer Datenbank gespeichert. Mit diesen Informationen lassen sich in bestimmten Situationen die Komfortfunktionen länger aufrecht erhalten.

Ein neuer Lösungsansatz für den Umgang mit der Bordnetzenergie während des Fahrbetriebs wurde von Siemens VDO vorgeschlagen. [31] Die Energieverteilung erfolgt dabei nach dem Prinzip der Börse, wo der „aktuelle Preis“ für die elektrische Energie in Abhängigkeit vom Energieangebot und der Nachfrage der Kfz-Komponenten bestimmt wird. Die einzelnen Komponenten melden ihren jeweiligen Energiebedarf und ihre Preissensibilität an einen Power Trader. Die Preissensibilität wird in Form einer Preis-/Mengenkurve abgebildet und gibt an, welche Energiemenge in Abhängigkeit vom aktuellen Preisniveau bezogen wird. Im Power Trader wird mittels linearer Optimierung ein Gleichgewichtspreis berechnet, der auf der konsolidierten Energienachfrage und dem aktuell verfügbaren Energieangebot beruht. Daraufhin erhalten die Komponenten ein Preisniveau für jede Leistung zwischen Null und ihrem aktuellen Energiebedarf, anhand dessen sie die Höhe ihrer Energieanforderung selbständig regeln. Für dieses Konzept ist der Schritt zum intelligenten Verbraucher zu vollziehen, bei dem die Komponenten selbständig ihren eigenen Leistungsbedarf bestimmen und kommunizieren können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mittels eines dynamischen Lastmanagements die bei der Dimensionierung eines 14 V Generators einzugehende Unsicherheit aufgrund des Kompromisses zwischen Kosten, Bauraum und Liegenbleibwahrscheinlichkeit minimiert werden kann. Ein Potenzial zur Erweiterung der Maßnahmen des dynamischen Lastmanagements ist hier noch in der Reduzierung von Leistungsspitzen beim gleichzeitigen Aktivieren von mehreren Verbrauchern zu sehen. Dazu wird im Folgenden ein Verfahren speziell für PWM-angesteuerte Komponenten vorgestellt, das auf den in [9] vorgestellten Konzepten basiert.

6.3.4 PWM-Scheduling

Heutzutage werden im Kraftfahrzeug unterschiedliche Heizsysteme, Elektromotoren und Leuchtmittel zur Leistungsregulierung pulsweitenmoduliert angesteuert. Durch das wie in Abbildung 6.8 schematisch dargestellte pulsweitenmodulierte Schalten kann es aufgrund des sternförmigen Leitungsnetzes im Bordnetz zu einer Aufsummierung von Strömen zu bestimmten Zeitpunkten an den Lastverteilungspunkten kommen. Gerade Heizsysteme erfordern einen hohen Leistungsbedarf im Bordnetz, der beispielsweise allein durch Scheibenheizungen und Sitzheizungen über 1 kW betragen kann. Diese Leistungsspitzen werden entweder durch die Batterie oder durch die Energiequelle gedeckt. Inwieweit die Batterie die Leistungsspitzen abpuffert, hängt von der Höhe der Pulsfrequenzen der Ansteuerung, der Regelzeitkonstante und der maximalen Ausgangsleistung der Energiequelle ab. Eine Reduzierung dieser Leistungsspitzen kann neben einer verbesserten Bordnetzstabilität zu einer veränderten Auslegungsmöglichkeit der Energieversorgung führen.

Im Folgenden wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Konzept vorgestellt, wie durch eine koordinierte zeitliche Ablaufsteuerung der PWM-Signale, dem PWM-Scheduling, eine Minimierung der im Bordnetz auftretenden Leistungsspitzen erreicht werden kann. Des Weiteren wird die Umsetzung des Konzeptes in ein entsprechendes Softwaremodell und dessen Funktionsverifizierung an einem Labormuster dargestellt. In Abschnitt 6.5 werden mit Unterstützung der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Toolkette zur Analyse und optimierten Auslegung die Auswirkungen des PWM-Scheduling auf die Auslegung der Bordnetzenergieversorgung am Beispiel eines Fahrzeugs mit alternativem Antrieb untersucht.

6.3.4.1 Konzept

Das Konzept des PWM-Scheduling im Bordnetz baut auf den in [9] entwickelten Schaltstrategien auf und ähnelt dem Konzept des versetzten Taktens bei einem Mehrphasen-DC/DC-Wandler. [22] Es wird beim PWM-Scheduling, wie in Abbildung 6.9 verdeutlicht, eine Verschiebung der PWM-Ansteuersignale durchgeführt, um ein gleichzeitiges Aktivieren und somit eine erhöhte Leistungsanforderung im Bordnetz weitestgehend zu minimieren. Die Verschiebung der Signale erfolgt dabei unter anderem in Abhängigkeit von der jeweils maximalen Leistungsaufnahme der zu steuernden Komponenten. Die in Abbildung 6.9 eingezeichneten gestrichelten Linien zeigen zum Vergleich die ursprünglichen Ansteuersignale einzelner Komponenten ohne PWM-Scheduling.

Weiterhin muss sichergestellt werden, dass das für die jeweiligen Komponenten geforderte Tastverhältnis, d.h. das Verhältnis von Pulsdauer zur Periodendauer, eingehalten wird. Dadurch wird die notwendige mittlere Leistungsaufnahme der Kompo-

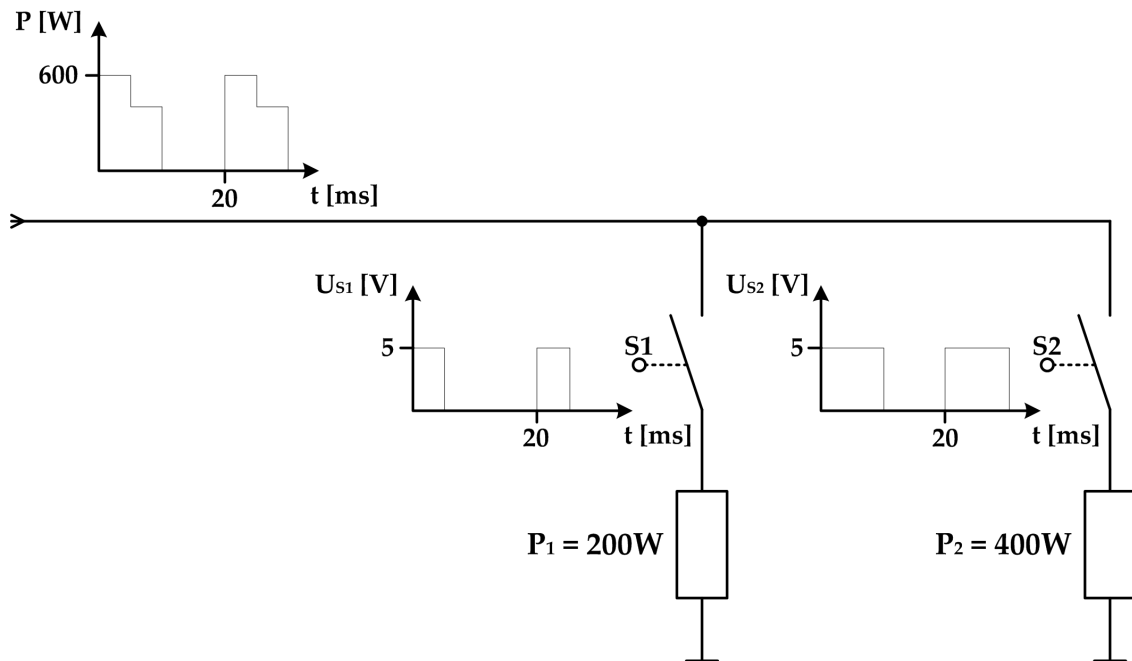


Abbildung 6.8: Leistungsspitzen durch gleichzeitiges Schalten der PWM-gesteuerten Komponenten

nente und somit die erforderliche Funktion gewährleistet. Die Ansteuerfrequenzen bleiben während des Betriebes unverändert, weil die aus EMV-Gründen verbauten Filter, wie in Abschnitt 4.1.6 beschrieben, an die jeweiligen Frequenzen der Komponenten angepasst sind. Beim PWM-Scheduling werden nur Signale mit gleichen Frequenzen miteinander verglichen und gegeneinander verschoben.

Bewertung

Für das PWM-Scheduling kommen grundsätzlich alle Aktoren in Betracht, die über einen Halbleiterschalter getaktet betrieben werden. Aktoren mit anderen Ansteuerverfahren wie z. B. EC-Motoren, die eine sogenannte Blockkommutierung benötigen, werden dagegen nicht im PWM-Scheduling eingebunden. [86] Der zu berücksichtigende Frequenzbereich der PWM-Signale kann von wenigen Hertz bis zu mehreren Kilohertz reichen. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Ausführungszeiten des PWM-Scheduling an die notwendigen Frequenzen der verbauten Komponenten gebunden ist.

Ein Problem bei der Umsetzung des PWM-Scheduling im Fahrzeug ist die Verteilung der Bordnetzfunktionen auf verschiedene Steuergeräte. D.h. die Ansteuerung der Aktoren erfolgt hierbei nicht über ein zentrales Steuergerät. Das PWM-Scheduling

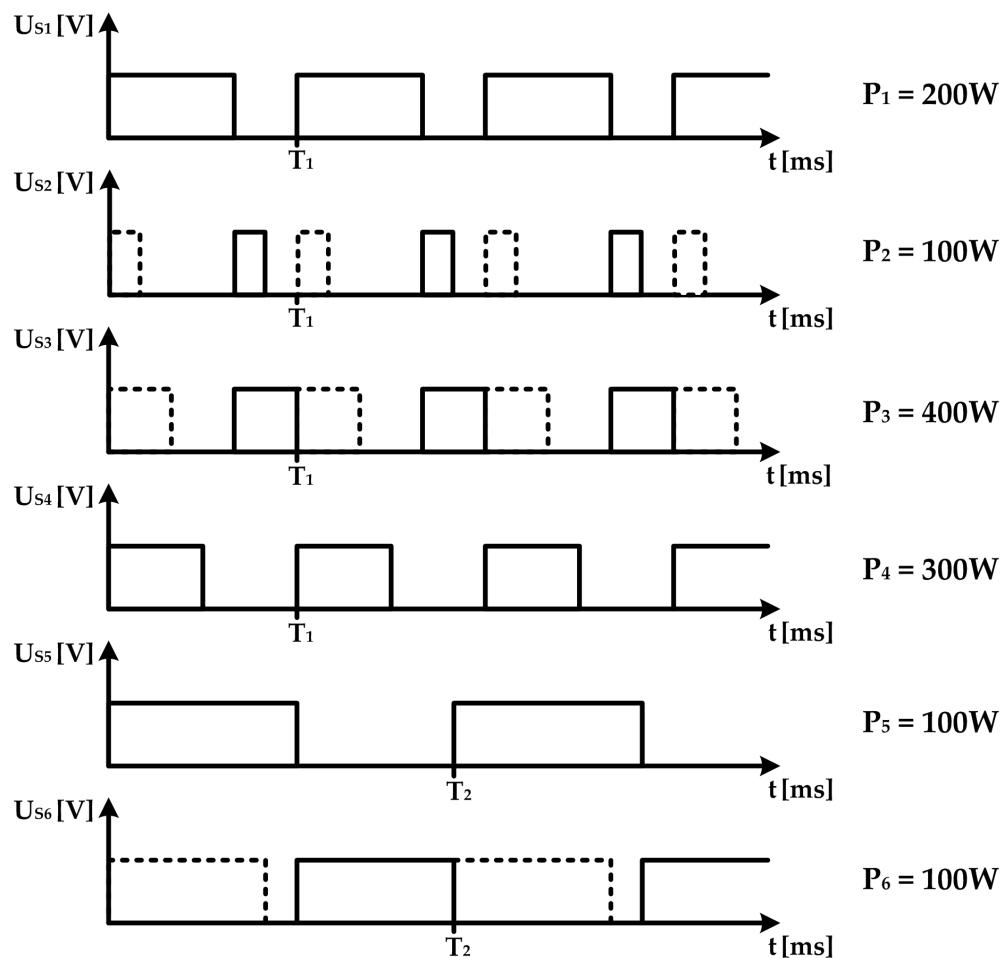


Abbildung 6.9: Konzept des PWM-Scheduling

muss daher neben der Optimierung der PWM-Signale eine zeitliche Synchronisierung der Leistungsstufen innerhalb der beteiligten Steuergeräte durchführen, um die korrekten Einschaltzeitpunkte der PWM-Signale zu gewährleisten. Dabei sind neben den Rechenzeiten der beteiligten Steuergeräte auch die Signallaufzeiten auf dem Datenbus mit zu berücksichtigen.

Eine alternative Lösung zur Vermeidung der Synchronisierung kann eine Gruppierung von physikalisch ähnlichen Komponenten sein, die jeweils über ein Steuergerät mittels des PWM-Scheduling angesteuert werden. Daraus würde eine Zunahme an zentralen Teilsystemen im Bordnetz resultieren. Es ist daher notwendig, diesen Lösungsansatz unter ganzheitlichen Aspekten der Bordnetzentwicklung wie zum Beispiel den Verkabelungsaufwand, den Funktionsgrad, die Zuverlässigkeit, Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit zu prüfen.

6.3.4.2 Softwaremodell und automatische Codegenerierung

Die Funktionsentwicklung des PWM-Scheduling erfolgte in Matlab/Simulink. Dabei wurden für das Softwaremodell folgende Vereinfachungen getroffen:

- Festlegung einer statischen PWM-Frequenz
- Keine Berücksichtigung der Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten bei der Optimierung

Das Softwaremodell besteht aus einer Eingangs- und Ausgangssignalverarbeitung und dem eigentlichen Steuerungsalgorithmus für das PWM-Scheduling. Der Steuerungsalgorithmus wurde in der Programmiersprache C umgesetzt und mit sogenannten S-Funktionen als Simulink-Modell eingebunden. Die Eingangssignalverarbeitung liest über konfigurierbare Simulink-Modelle für CAN-Transceiver und digitale Ports der Embedded Target C166 - Toolbox Sensordaten und Schalter- bzw. Tasterbetätigungen ein. Die Ausgabeeinheit des Softwaremodells setzt die aus dem Steuerungsalgorithmus errechneten optimalen Einschaltzeitpunkte auf die jeweiligen digitalen Ausgangsports um. Abbildung 6.10 zeigt den generellen Ablauf des Softwaremodells.

Um die jeweiligen Einschaltzeitpunkte bei einer PWM-Frequenz von 100 Hz korrekt ausgeben zu können, wird das Softwaremodell mit einer Zykluszeit von 2ms gerechnet. Es handelt sich hierbei um ein interrupt-basiertes System, welches erst bei Änderungen der Eingangsparameter eine neue Berechnung des Steuerungsalgorithmus durchführt und somit den Rechenaufwand reduziert. Für die Applikation des PWM-Scheduling wird ein Programmspeicher von mindestens 27kB auf dem Mikrocontroller benötigt.

Der für die Verifizierung im Labormuster benötigte C-Quellcode wurde durch die Matlab/Simulink-Toolboxen Real-Time-Workshop, Embedded Coder und Embedded Target C166 gewonnen. Abbildung 6.11 gibt hierzu einen Überblick über die genutzte Toolkette. Diese wurde für eine automatische Codegenerierung konfiguriert, die das Simulink-Modell direkt in einen C-Quellcode überführt, den Compiler startet und nach erfolgreicher Compilierung das übersetzte Programm auf den Mikrocontroller mit Hilfe des Debuggers der C166-Entwicklungsumgebung lädt. Hiermit hat man den Vorteil gewonnen, aus einer abstrakten Systembeschreibung, dem Softwaremodell in Matlab/Simulink, die gesamte Applikation oder zumindest die Spezifikation ausführbar und damit Tests zugänglich zu machen. Dadurch wurden höhere Entwicklungsgeschwindigkeiten und geringere Fehlerraten beim Quellcode erreicht.

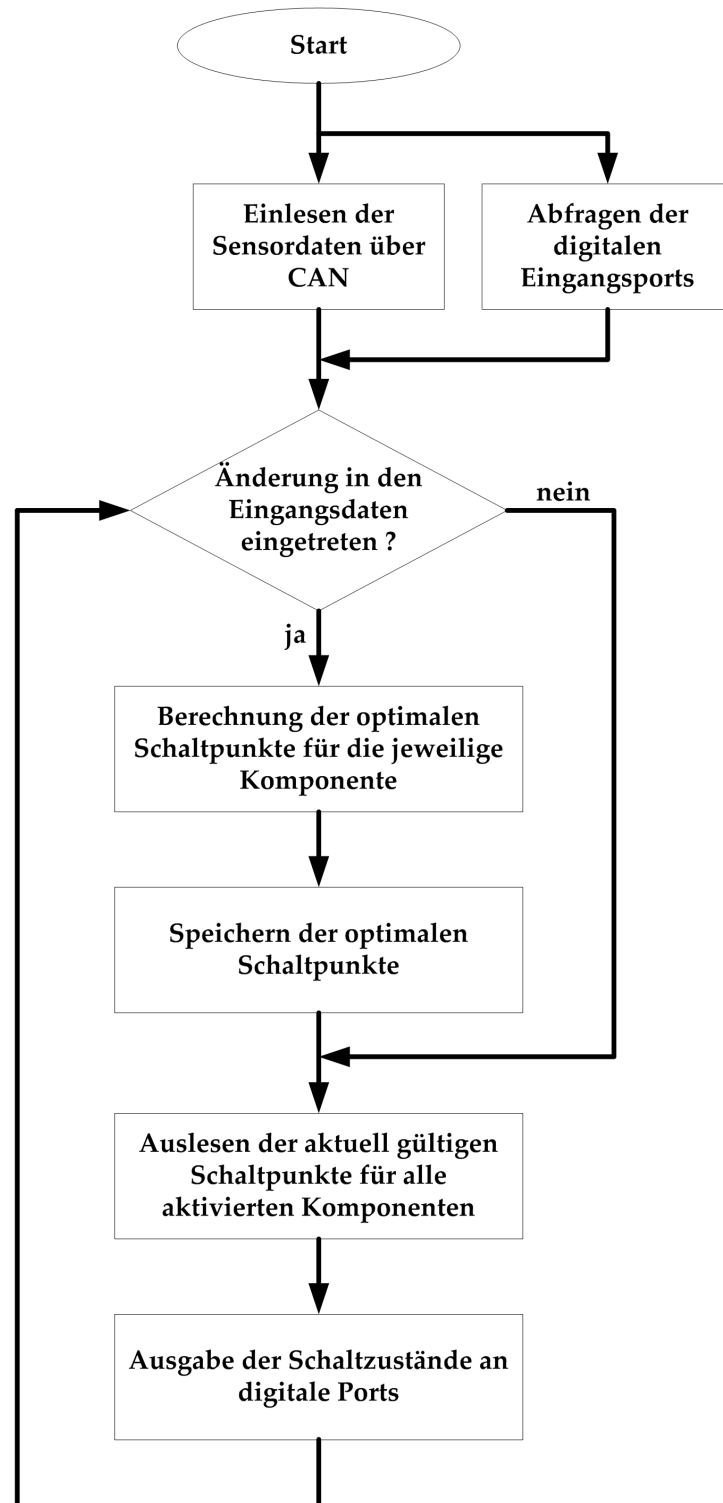


Abbildung 6.10: Funktionsablauf des Softwaremodells

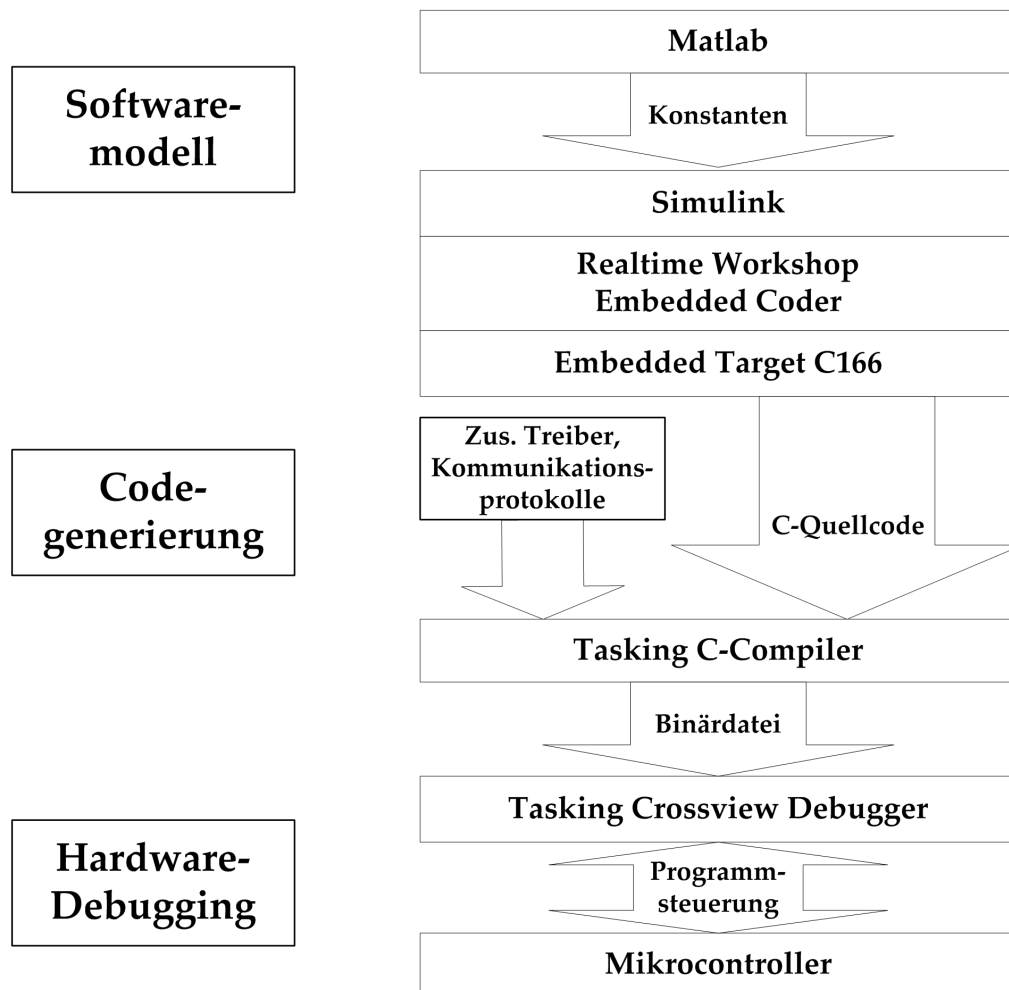


Abbildung 6.11: Toolkette zur Generierung des Quellcodes für den Mikrocontroller

6.3.4.3 Labormuster

Da sich der Hardwarezugang zu den Bordnetzkomponenten in einem Fahrzeug als äußerst aufwendig erweist, ist für die Funktionsverifizierung des PWM-Scheduling ein Labormuster aufgebaut worden. Der grundlegende Aufbau des Labormusters ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Das Steuergerät wurde mechanisch und elektrisch derart aufgebaut, dass auch eine Verifizierung mit realen Bordnetzaktoren im Fahrzeugeinsatz möglich ist.

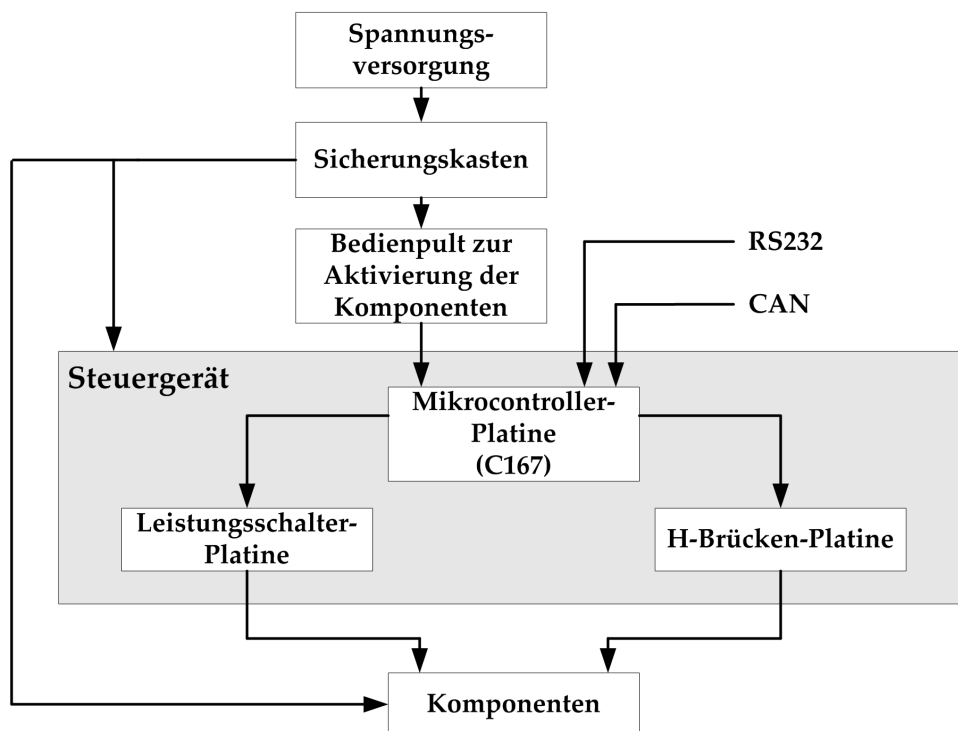


Abbildung 6.12: Aufbau des Labormusters

Eingesetzte Hardware

Da der Mikrocontroller C167 der Firma Infineon momentan auch in der Kfz-Elektronik eingesetzt wird, wurde als Mikrocontroller-System ein Minimodul 80C167CS der Firma Phytex mit 256 kB RAM- und 256 kB ROM-Speicher verwendet.

Als Kommunikationsschnittstellen wurden eine RS232- und zwei CAN-Schnittstellen verbaut. Die RS232-Schnittstelle dient zur Übertragung der auf dem PC entwickelten Software auf den Mikrocontroller und zum Debugging. Über die CAN-Schnittstellen, die durch entsprechende Transceiver auf ein High-Speed-Netzwerk ausgelegt sind,

werden unterschiedliche Temperaturmesswerte der Kühl- und Heizsysteme gesendet.

Die Ausgangsports des Mikrocontrollers steuern die „Leistungsplatinen“ an, die aus H-Brücken und Highside-Schaltern bestehen. Für die H-Brücke wurden standardmäßige Power-MOSFETs verwendet. Als Highside-Schalter wurde der BTS555 der Firma Infineon eingesetzt. Dabei dienen die H-Brücken zur Ansteuerung der Elektromotoren mit Option zur Drehrichtungsumkehr und die Highside-Schalter zum Aktivieren der Heizsysteme. Die Ausgangsports des Mikrocontrollers sind aus Schutzgründen über Optokoppler von den „Leistungsplatinen“ getrennt.

Für die Nachbildung der im Fahrzeug verbauten Bordnetzaktoren wurden handelsübliche Aktoren verwendet, die die gleichen physikalischen Eigenschaften, aber eine weitaus geringere Leistungsaufnahme besitzen. Tabelle 6.2 zeigt die für das Labormuster ausgewählten Komponenten und deren Leistungsaufnahme im Vergleich zu den Originalkomponenten im Fahrzeug mit alternativem Antrieb.

Komponente	Nennleistung im Fahrzeug	Nennleistung im Muster
Innenraumlüfter	340 W	8 W
Kühlmittelpumpe	100 W	3 W
Kühlerlüfter	200 W	4,8 W
Batterielüfter	50 W	1,6 W
Heckscheibenheizung	270 W	12 W
Frontscheibenheizung	470 W	24 W
Sitzheizung	110 W	6 W

Tabelle 6.2: Verbaute Komponenten im Labormuster

6.3.4.4 Verifizierung des PWM-Scheduling

Da das Betriebsverhalten bzw. die erforderliche Leistungsaufnahme der im Bordnetz verbauten Kühl- und Heizsysteme temperaturabhängig ist, wurden für die Verifizierung des PWM-Scheduling unterschiedliche Temperaturszenarien und somit verschiedene Tastverhältnisse der PWM-Signale zugrunde gelegt. Tabelle 6.3 zeigt für einen Temperaturbereich der Umgebungsluft von -10°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ die angenommenen „worst-case“-Tastverhältnisse der ausgewählten Elektromotoren des Kühlsystems für ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb.

Szenario	Temperatur- bereich	Kühlmittel- pumpen	Kühler- lüfter	Batterie- lüfter	Tastverhältnis	
					Innenraum- lüfter (vorne)	Innenraum- lüfter (hinten)
1	-10 °C...0 °C	0,5	0	0	0,5	0,2
2	0 °C...10 °C	0,6	0,2	0,1	0,5	0,2
3	10 °C...20 °C	0,7	0,3	0,3	0,6	0,4
4	20 °C...30 °C	0,8	0,7	0,4	0,6	0,4
5	30 °C...40 °C	0,9	0,8	0,5	0,8	0,6

Tabelle 6.3: Tastverhältnisse für verschiedene Temperaturbereiche

Abbildung 6.13 und 6.14 stellen hierzu exemplarisch für Szenario 3 (+10 °C bis +20 °C) den Verlauf des Gesamtstroms ohne und mit PWM-Scheduling dar, wo die Wirkung des PWM-Scheduling auf den Maximalstrom deutlich wird. Das hier deutlich zu erkennende Rauschen resultiert daraus, dass die Elektromotoren nicht optimal entstört wurden. Es konnte mit allen Szenarien die korrekte Funktionsweise des PWM-Scheduling gezeigt werden. Tabelle 6.4 fasst die Ergebnisse der einzelnen Szenarien zusammen. Diese zeigen das hohe Potenzial zur Reduzierung der Maximalströme bei PWM-gesteuerten bzw. geregelten Komponenten bis zum Szenario 4. Szenario 5 führt aufgrund der hohen Tastverhältnisse der jeweiligen Komponenten zu keiner Optimierung.

Außerdem ist ersichtlich, dass die mittlere Stromaufnahme bis auf die zweite Nachkommastelle ohne und mit PWM-Scheduling übereinstimmen, wodurch die geforderte Leistungsaufnahme der Komponenten sichergestellt ist. Die hier auftretende Abweichung der zweiten Nachkommastelle ist auf das verrauschte Stromsignal der Elektromotoren zurückzuführen.

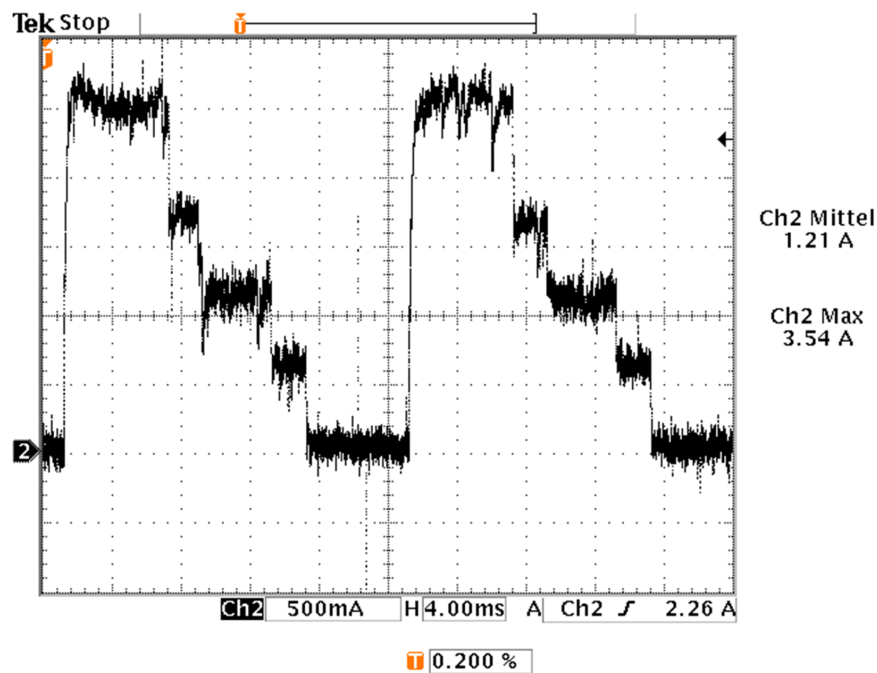


Abbildung 6.13: Verlauf des Gesamtstroms beim Szenario 3 ohne PWM-Scheduling

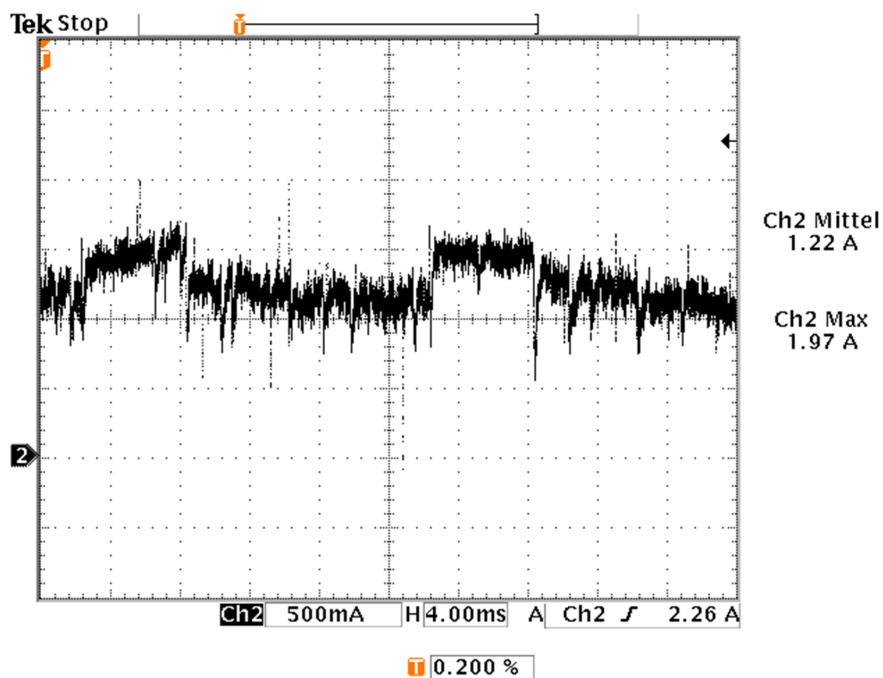


Abbildung 6.14: Verlauf des Gesamtstroms beim Szenario 3 mit PWM-Scheduling

Szenario	Ohne PWM-Scheduling		Mit PWM-Scheduling		Einsparpotenzial in der Stromspitze
	Maximaler Gesamtstrom	Mittlerer Gesamtstrom	Maximaler Gesamtstrom	Mittlerer Gesamtstrom	
1	2,01 A	0,85 A	1,59 A	0,85 A	20,9%
2	3,03 A	1,10 A	1,74 A	1,11 A	42,6%
3	3,54 A	1,21 A	1,97 A	1,22 A	44,4%
4	3,54 A	1,44 A	2,14 A	1,45 A	39,5%
5	3,54 A	1,64 A	3,54 A	1,66 A	0%

Tabelle 6.4: Messergebnisse des Labormusters für die einzelnen Szenarien mit und ohne PWM-Scheduling

6.4 Toolkette Avanti (S)

Wie in Abschnitt 5.1.4 bereits beschrieben, wurden für die Simulation der Bordnetzkomponenten und des Energiemanagements die beiden Tools Matlab/Simulink und Simplorer ausgewählt und zu einer Simulationsumgebung verbunden. Um dem Anwender die Bedienung dieser Simulationsumgebung zu vereinfachen, wurde das Tool Avanti entwickelt, welches eine anwenderorientierte Eingabeumgebung für alle Simulationsparameter zur Verfügung stellt und die beiden Simulationstools größtenteils vor dem Anwender versteckt. Zusätzlich ermöglicht es eine detaillierte Auswertung und Analyse der Simulationsergebnisse.

6.4.1 Motivation

Eine zentrale Problemstellung bei der Erstellung einer Simulationsumgebung ist die Erfassung der Vielzahl an System- und Komponentenparametern. Hieraus leitet sich die Aufgabe von Avanti ab, eine anwenderorientierte Eingabeumgebung für diese Parameter zur Verfügung zu stellen. Dabei gilt es, drei wesentlichen Anforderungen gerecht zu werden:

1. Erstellung beliebiger Energienetztopologien mit Hilfe dieser Modelle
2. Möglichkeit des Einbindens von VHDL-AMS-Komponentenmodellen

3. Berücksichtigung verschiedener Umgebungsszenarien wie z. B. klimatischer Einflüsse, verschiedener Strecken und möglicher Fahrerverhalten

Zum anderen müssen aus diesen Daten die gültigen Eingabedaten für die Simulationsumgebung generiert werden. Zu den Eingabedaten gehören folgende Daten:

1. Netz-Topologie (der räumliche Aufbau des Netzes)
2. Beschreibung der einzelnen Komponenten
3. Umwelteinflüsse und Randbedingungen (Klimabedingungen, Strecke)
4. Fahrerprofile

Es ergibt sich folgender Arbeitsablauf, der in Abbildung 6.15 zusammen mit der gesamten Toolkette, bestehend aus Avanti, Matlab/Simulink und Simplorer dargestellt ist:

1. Eingabe der relevanten Daten durch den Benutzer
2. Vorbereitung der Simulationsdaten für Matlab und Simplorer
3. Durchführung der Co-Simulation durch Matlab und Simplorer
4. Übermittlung der Ergebnisdaten an Avanti
5. Auswertung und Visualisierung der Daten durch Avanti

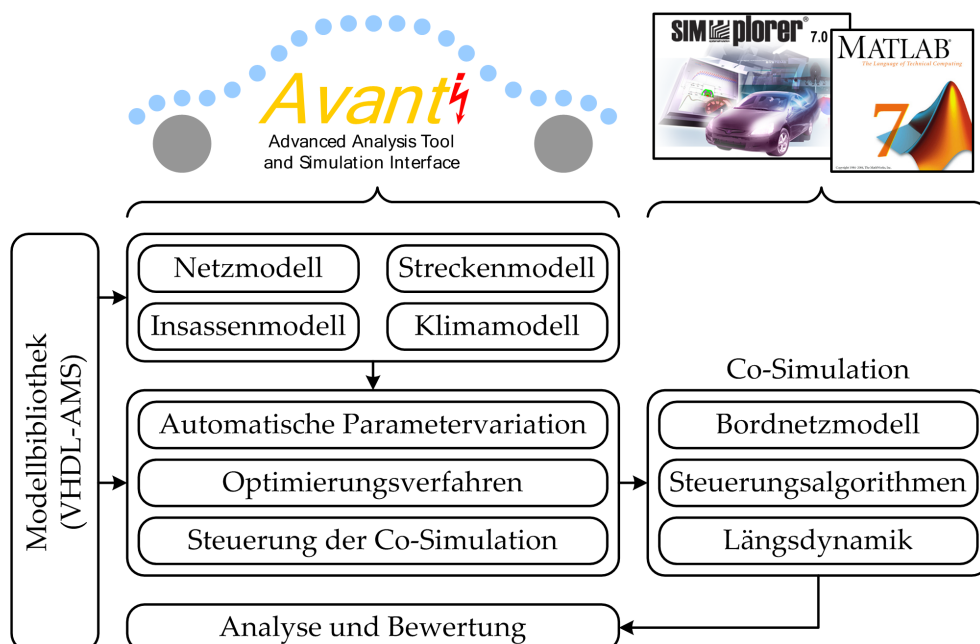


Abbildung 6.15: Konzept der Toolkette

Avanti wurde vollständig in Java (Version 1.6.0-Beta2) programmiert. Java ist eine objektorientierte Programmiersprache und als solche ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Sun Microsystems. Java-Programme werden in Bytecode übersetzt und dann in einer speziellen Umgebung ausgeführt, die als Java-Laufzeitumgebung oder Java-Plattform bezeichnet wird, die die Programme ausführt, indem sie den Bytecode interpretiert. [109] Für den Dateiaustausch mit der Simulationsumgebung und zur Speicherung von Programmdateien wurden offene Dateiformate wie XML und CSV verwendet. Die Extensible Markup Language, abgekürzt XML, ist ein Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente in Form einer Baumstruktur. XML definiert dabei die Regeln für den Aufbau solcher Dokumente. XML ist ein Standard zur Definition von beliebigen, in ihrer Grundstruktur jedoch stark verwandten Auszeichnungssprachen. [107] Eine CSV-Datei ist eine Textdatei zur Speicherung oder zum Austausch einfach strukturierter Daten. Das Kürzel CSV steht dabei für *Character Separated Values* oder *Comma Separated Values*, weil die einzelnen Werte durch ein spezielles Trennzeichen, beispielsweise das Komma, getrennt werden. Ein allgemeiner Standard für das Dateiformat existiert nicht. [105].

6.4.2 Energienetzsimulation

Die Basis der gesamten Toolkette bildet die Simulationsumgebung mit den Tools Matlab/Simulink und Simplorer. Ihr Aufbau wird im folgenden Abschnitt erläutert. Anschließend wird die Anbindung an ein bereits vorhandenes Längsdynamik-Modell beschrieben. In Abschnitt 6.4.2.3 wird dargestellt, wie sich der Umfang der Simulation auf die benötigte Rechenzeit auswirkt.

6.4.2.1 Aufbau der Simulationsumgebung (Matlab/Simulink und Simplorer)

Die beiden Tools Matlab/Simulink und Simplorer wurden bereits in Abschnitt 5.1.4 vorgestellt. An dieser Stelle wird nun der Aufbau der Simulationsumgebung mit diesen beiden Tools beschrieben, die zusammen in einer Co-Simulation betrieben werden. Die Erstellung einer solchen Co-Simulation besteht aus fünf Schritten:

1. Aufteilung der Simulationsaufgabe auf Matlab/Simulink und Simplorer
2. Modellierung in Simplorer
3. Modellierung in Matlab/Simulink
4. Parametrierung der Schnittstelle
5. Start der Simulation aus Matlab/Simulink heraus

Zunächst muss entschieden werden, welche Teile des Modell in Matlab/Simulink und welche in Simplorer modelliert werden sollen. In Abschnitt 5.1.4.2 wurde bereits beschrieben, dass die Simulation der Energiemanagementfunktionen in Matlab/Simulink und die Simulation des Energienetzes in Simplorer erfolgen soll. Anschließend erfolgt die Modellierung beider Teile in den jeweiligen Tools. Dann folgt die Parametrierung der Schnittstelle. Diese liegt in Form einer DLL¹ vor und wird in Simulink als S-Function² eingebunden. Über einen Konfigurationsdialog innerhalb von Simplorer können Ein- und Ausgangssignale eingetragen werden, wobei ein Eingang in Richtung Simulink → Simplorer und ein Ausgang in Richtung Simplorer → Simulink definiert ist. Aus Simplorer heraus wird dann ein Simulationsskript exportiert, welches die Schnittstellendefinition und die Netzliste des Modells enthält. Dieses Skript wird anschließend in Simulink als Parameter der S-Function übergeben. Anschließend kann die Simulation aus Matlab/Simulink heraus gestartet werden. Simplorer wird dann als Slave von Matlab/Simulink aufgerufen.

Da die beiden Simulationstools von Avanti gesteuert werden sollten, mussten diese Schritte automatisiert werden. Dafür wurde zunächst die Anzahl der Ein- und Ausgänge der Schnittstelle auf jeweils 128 festgelegt. Bei jeder Simulation ist daher immer die gleiche Anzahl Ein- und Ausgänge vorhanden, auch wenn nicht alle benutzt werden. Die Schnittstellenparametrierung erfolgt normalerweise, wie bereits erwähnt, über einen Konfigurationsdialog innerhalb von Simplorer und wird von Simplorer anschließend in drei Textdateien gespeichert, die bei der Simulation ausgelesen werden. Zur Automatisierung der Parametrierung wurde das Format dieser Dateien analysiert. So wurde die Erstellung auch ohne den Konfigurationsdialog durch direktes Erzeugen der Dateien möglich gemacht.

Neben der Schnittstellenparametrierung sind für die Co-Simulation noch ein Simulationsskript für Simplorer und ein Simulink-Modell notwendig. Das Simulink-Modell enthält als zentrales Element die Schnittstelle zu Simplorer und im einfachsten Falle auch nur diese. Abbildung 6.16 zeigt dieses Modell. Das Simulink-Modell kann

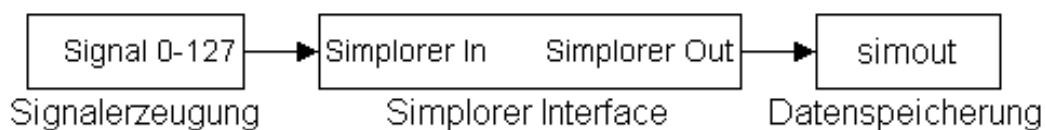


Abbildung 6.16: Einfachstes Simulink-Modell mit der Schnittstelle zu Simlorer

¹Eine Dynamic-Link Library (DLL) ist eine unter Microsoft Windows verwendete Programm Bibliothek. Das Dateiformat für DLLs ist dasselbe wie bei Windows-Programmen (EXEs). Sowohl EXEs als auch DLLs können Programmcode (Maschinencode), Daten und Ressourcen in beliebiger Kombination enthalten. [106]

²Mit einer S-Function können eigener Code (z. B. in C oder Fortran) und DLLs von Fremdanbietern in Simulink integriert werden.

durch viele Funktionen erweitert werden. Dazu gehören z. B. Energiemanagement-funktionen, wie sie in Abschnitt 6.3 beschrieben wurden. Das Simulationsskript für Simplorer wird direkt aus Avanti heraus erzeugt, siehe hierzu Abschnitt 6.4.3.

Die eigentliche Co-Simulation wird aus Matlab heraus gestartet, welches von Avanti aufgerufen wird. Matlab führt dann ein Skript (Quelltext 6.1) aus, das die Simulation vorbereitet und startet. Das Skript lädt zunächst (Zeilen 2-5) die für die Simulation benötigten Eingabedaten, die von Avanti zur Verfügung gestellt werden (siehe Abschnitt 6.4.3 und 6.4.4). Diese Daten werden im CSV-Format gespeichert, da Matlab dieses Dateiformat unterstützt und es sehr einfach handhabbar ist. In Zeile 8 wird die Simulation durch den Aufruf des entsprechenden Simulink-Modells gestartet. Nach Abschluss der Simulation werden in den Zeilen 11-16 die Ergebnisse gespeichert. Die 128 Kanäle der Schnittstelle zwischen Simulink und Simplorer werden zur Verminderung des Speicherbedarfs zunächst mit einer Schrittweite von 100 ms abgetastet und anschließend einzeln in CSV-Dateien abgelegt. Die Abtastrate kann bei Bedarf angepasst werden, z. B. wenn kürzere Zeiträume untersucht werden sollen. Die CSV-Dateien werden später von Avanti für die Analyse-Funktionen genutzt. Zum Schluss wird Matlab aus dem Skript heraus beendet. Beim Start der Simulation wird Simplo-

```

1 %Daten aus Eingabedateien laden
2 load ('avanti_mdl.mat');           % Modell-Daten
3 activation=csvread('aktivierung.csv'); % Aktivierungsmuster
4 cycle=csvread('zyklus.csv',1,0);   % Streckendaten
5 climate=csvread('klima.csv',1,0);  % Klimadaten
6
7 %Simulation starten
8 tout = sim ('avanti.mdl');
9
10 %Ergebnisse_speichern
11 tout_i=_ (0:0.1:round(max(tout)))';
12 csvwrite ('t_out.csv'),tout_i);
13 for i = 0:127
14     simout_i = interp1 (tout,simout(:,i+1),tout_i);
15     csvwrite (strcat(int2str(i),'.csv'),simout_i);
16 end
17
18 %Matlab beenden
19 quit;

```

Quelltext 6.1: Matlab-Simulationsskript

rer von Matlab/Simulink gestartet und kompiliert zunächst das Simulationsskript. Anschließend wird der Simplorer-Simulator gestartet. Über die Schnittstellen-DLL synchronisieren sich die beiden Tools und beginnen mit der Co-Simulation. Dabei

können die Tools die Simulationsschrittweite dynamisch festlegen, sofern dies nicht durch die Einstellungen in den Modellen verhindert wird. Das Ende der Simulation wird durch die in Avanti eingegebene und an Simplorer übertragene Zeit festgelegt.

6.4.2.2 Anbindung an die Simulation der Fahrzeuglängsdynamik

Da das energetische Verhalten vieler Bordnetzkomponenten (z. B. Kühlsysteme) von der Fahrdynamik abhängt, muss auch diese in der Simulation berücksichtigt werden. Dazu wurde ein bereits vorhandenes, in Simulink entwickeltes Längsdynamik-Modell in die Simulationsumgebung integriert. Dieses Modell enthält die folgenden Bestandteile:

- Fahrzeug-Längsdynamik (Fahrwiderstände etc.)
- Getriebe
- Antrieb
- Nebenaggregate (z. B. Klimaanlage)
- Batteriesystem (Hochspannungsseite)
- Energieverteilung

Das Längsdynamik-Modell übermittelt dem Rest der Simulationsumgebung die für die Berücksichtigung der Fahrdynamik im Bordnetz notwendigen Daten:

- *Traktionsnetzspannung*: Der Wirkungsgrad des Bordnetzwandlers ist abhängig von der Spannung im Traktionsnetz.
- *Ist-Geschwindigkeit*: Abhängig von der Geschwindigkeit bzw. der Beschleunigung wird z. B. die Unterdruckpumpe für das Bremssystem aktiviert.
- *Verlustleistung des Antriebs*: Mit einem thermischen Modell des Antriebs wird die Kühlwassertemperatur ermittelt, die Auswirkungen auf die Aktivierung der Kühlmittelpumpen und Kühlerlüfter hat.

Im Gegenzug erhält das Längsdynamik-Modell folgende Größen aus der Simplorer-Simulation:

- *Soll-Geschwindigkeit*: Sie wird dem in Avanti definierten Zyklus entnommen und an den entsprechenden Stellen im Längsdynamik-Modell eingelesen.
- *Eingangsstrom des Bordnetzwandlers*: Dieser Strom wird der Energieverteilung übermittelt und dort als zusätzliche Last im Traktionsnetz berücksichtigt.

6.4.2.3 Rechenzeit

Je nach Umfang der Simulation können die Simulationszeit und der Speicherbedarf sehr groß werden. Zur Bewertung wurden mehrere Testsimulationen durchgeführt.

Die einfachste Variante dabei ist, nur das Netzmodell von Simplorer simulieren zu lassen und in Simulink nur die Schnittstelle, wie in Abbildung 6.16 dargestellt, zu nutzen. In diesem Fall ist die Simulationsschrittweite nur von den im Netzmodell definierten Komponentenmodellen abhängig. Für das Netzmodell eines normal ausgestatteten Fahrzeugs ergibt sich dabei ein Simulationszeitquotient von ca. 0,8. Der Simulationszeitquotient ist definiert als das Verhältnis zwischen benötigter Rechenzeit und simulierter Zeit:

$$SZQ = \frac{t_r}{t_{sim}} \quad (6.2)$$

Je kleiner der SZQ ist, desto schneller läuft dementsprechend die Simulation ab.

Sollen zusätzlich zum Netzmodell Energiemanagementfunktionen in Simulink simuliert werden, vergrößert sich der SZQ, da die Simulation dieser Funktionen zusätzliche Rechenzeit benötigt. Außerdem können die Funktionen eine feste Simulationsschrittweite voraussetzen. In diesem Fall kann Simplorer keine variable Schrittweite nutzen und die Rechenzeit verlängert sich zusätzlich. Wird das in Abschnitt 6.3.4 vorgestellte PWM-Scheduling für die koordinierte Ansteuerung der Heizsysteme in die Simulation einbezogen, so ergibt sich ein SZQ von ca. 2,6. Sollen allerdings die Kühlsysteme (Ventilatoren und Pumpen) mit dem PWM-Scheduling angesteuert werden, so ergibt sich für den SZQ ein Wert von 40, da in diesem Fall mit einer festen Schrittweite von 1 ms simuliert werden muss. Dies führt neben der sehr großen Simulationszeit zu einem sehr großen Speicherbedarf.

Bei der Einbindung des Längsdynamik-Modells wird die Simulationsschrittweite auf 10 ms festgesetzt, da dieses Modell Steuerungsalgorithmen enthält, die auf diese Zeitbasis abgestimmt sind. Für eine komplette Simulation mit Netzmodell, Energiemanagementfunktion und Längsdynamik ergibt sich ein SZQ von ca. 3,7.

6.4.3 Generierung von Netzmodellen

Sowohl die Struktur und die Komponenten der Bordnetze verschiedener Fahrzeuge als auch die Ausstattungsgrade eines Fahrzeugs unterscheiden sich teilweise sehr deutlich. Daher muss für die Simulation eines bestimmten Fahrzeugbordnetzes dessen Aufbau zunächst erfasst und für die Simulationsumgebung zur Verfügung gestellt werden. Hierfür wurde in Avanti eine grafische Eingabemöglichkeit implemen-

tiert. Die Struktur und die Komponenten des Bordnetzes werden im Folgenden als *Netzmodell* bezeichnet.

Das Netzmodell besteht aus zwei verschiedenen Arten von Elementen: Leitungen und Komponenten. Zusätzlich werden vier verschiedene Typen von Komponenten unterschieden, wie sie in Tabelle 6.5 aufgeführt sind. Eine Leitung verbindet zwei

Komponententyp	Energiefluss	Beispiel
Quellen	Energieabgabe	Spannungsquelle
Speicher	Energieabgabe und -aufnahme	Batterie
Verteiler	Energieverteilung	DC/DC-Wandler, Stromverteiler
Verbraucher	Energieaufnahme	Sitzheizung, Kühlerlüfter

Tabelle 6.5: Komponententypen

oder mehr Komponenten eines Energienetzes miteinander. Eine *Quelle* ist eine Komponente, die Energie zur Verfügung stellt. *Speicher* und *Verteiler* sind Komponenten, in die Energie hineinfließen und aus denen Energie herausfließen kann. Allerdings kann ein Verteiler dabei keine Energie speichern. Es können verlustfreie und verlustbehaftete Verteiler existieren. Im ersten Fall entspricht er im elektrischen Sinn einem Potentialknoten, der Energie ideal verteilt. Ein Beispiel für einen verlustbehafteten Verteiler wäre ein DC/DC-Wandler. Ein *Verbraucher* ist eine Komponente, die die eingehende Energieform in eine andere Energieform überführt. Ein Beispiel dafür ist eine Glühlampe, die elektrische Energie in Licht und Wärme umwandelt.

Der Aufbau und die Verschaltung der obigen Komponententypen muss mit einem geeigneten Datenmodell repräsentiert werden. Abbildung 6.17 zeigt ein einfaches Kfz-Bordnetz mit Generator, Batterie und zwei separat abgesicherten Verbrauchergruppen als elektrisches Ersatzschaltbild. Diese Darstellung ist relativ komplex. Die Topologie des Netzes ist so nur schwer darstellbar, zudem ist die Darstellung des Massepfades eigentlich nicht notwendig, da im Fahrzeug nur eine Masse existiert. Daher ist eine andere Form der Darstellung an dieser Stelle sinnvoller. Es wurde dafür das Modell eines Graphen verwendet. Ein Graph ist eine Menge von Knoten, die durch Kanten miteinander verbunden sein können. Es wird zwischen verschiedenen Arten von Graphen unterschieden. Ein Graph kann zum einen endlich oder unendlich, und zum anderen gerichtet oder ungerichtet sein. Endliche Graphen besitzen eine endliche Menge Knoten und Kanten, während diese Menge bei unendlichen Graphen nicht endlich ist. Bei gerichteten Graphen besitzen die Kanten eine

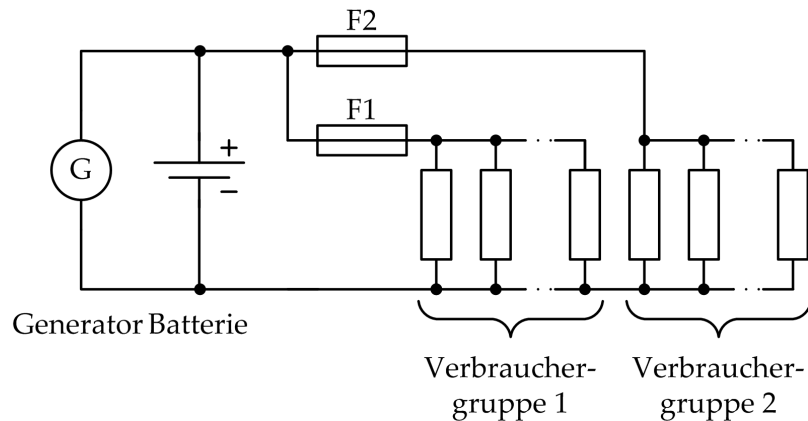


Abbildung 6.17: Einfaches Kfz-Bordnetz dargestellt als elektrisches Ersatzschaltbild

Richtung, gekennzeichnet durch einen Pfeil. Außerdem kann ein Graph gewichtet sein, d. h. seine Kanten sind mit Zahlen oder Farben gekennzeichnet, um eine Wertigkeit auszudrücken. Abbildung 6.18 zeigt ein Beispiel für einen endlichen, gerichteten, gewichteten Graphen. Das Beispielnetz aus Abbildung 6.17 ist in Abbildung 6.19

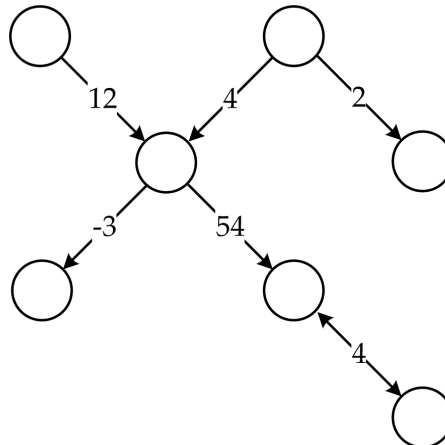


Abbildung 6.18: Beispiel für einen endlichen, gerichteten, gewichteten Graphen

als Graph dargestellt. Die Bordnetzkomponenten bilden dabei die Knoten des Graphen, während die elektrischen oder thermischen Verbindungen zwischen den Komponenten den Kanten entsprechen. Hier ist die Topologie sehr deutlich erkennbar. Abbildung 6.20 zeigt die in Avanti implementierte Eingabemaske für das Netzmodell. Zu sehen ist eine beispielhafte Bordnetzstruktur in der Darstellung als Graph. Über ein Kontextmenü kann jeder Knoten konfiguriert werden. Dazu gehört, dem

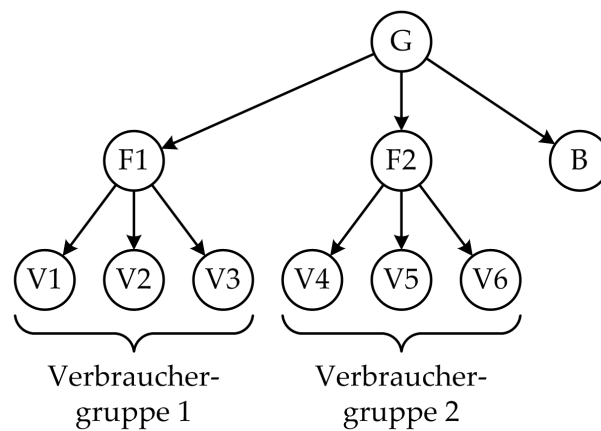


Abbildung 6.19: Einfaches Kfz-Bordnetz dargestellt als Graph

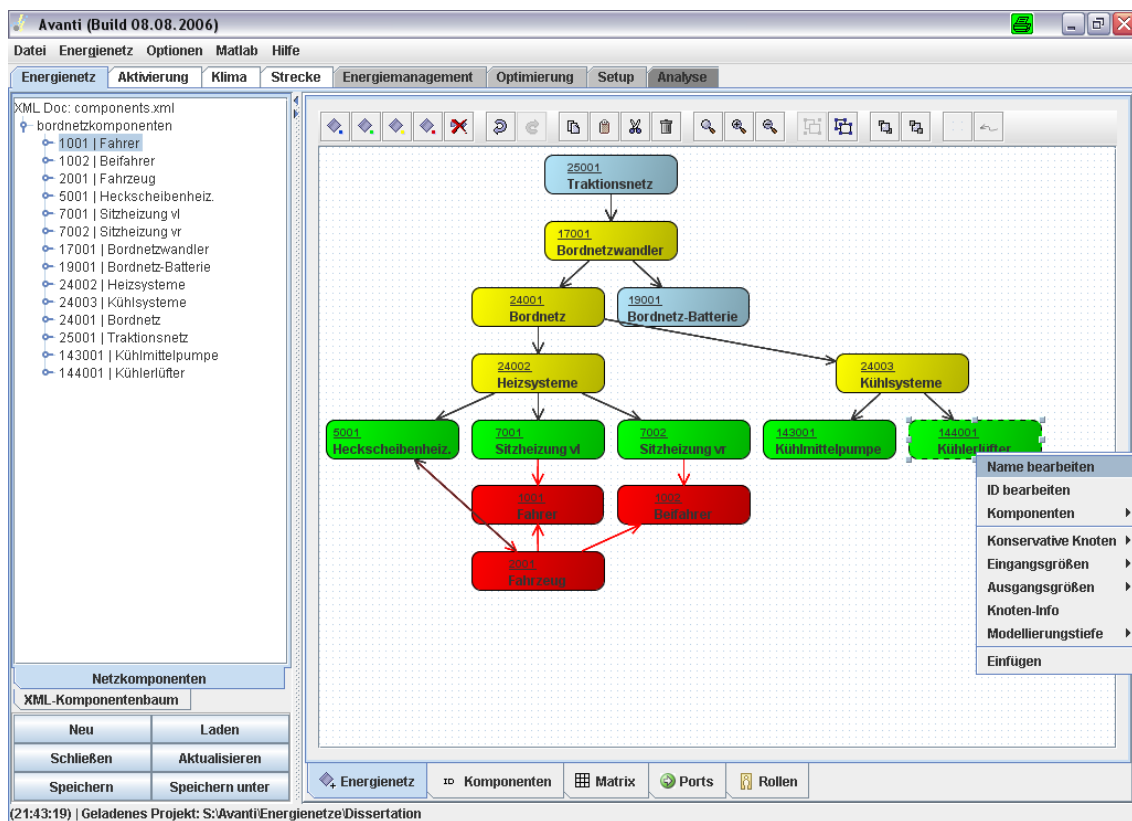


Abbildung 6.20: Eingabemaske für das Netzmodell

Knoten die gewünschte *Komponentenklasse* zuzuweisen und ihm einen Namen zu geben. Der Zusammenhang zwischen Klassen und Komponenten ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Aus einem VHDL-AMS-Modell können verschiedene Komponentenklas-

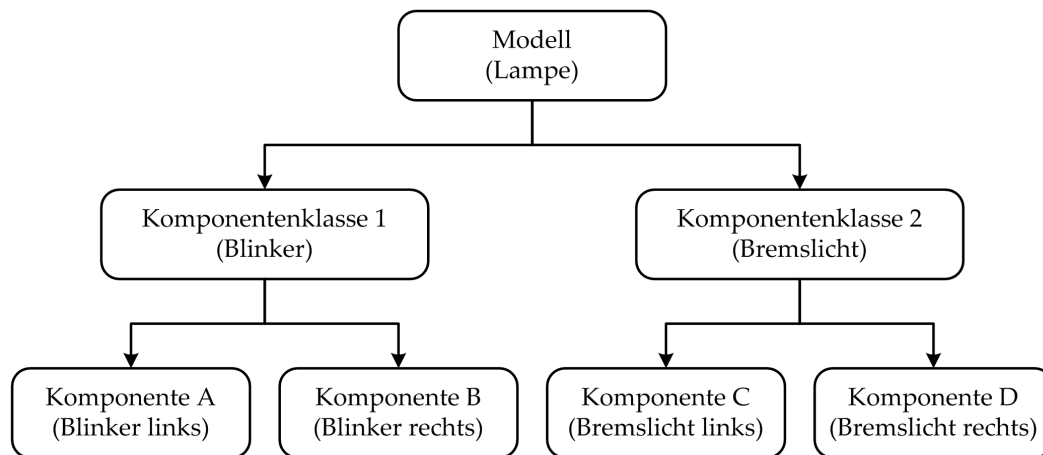


Abbildung 6.21: Klassenstruktur der Modelle und Komponenten

sen abgeleitet werden. Wie in Abbildung 6.21 dargestellt, kann z. B. aus einem Lampenmodell eine Klasse *Blinker* und eine Klasse *Bremslicht* erzeugt werden. Ein anderes Beispiel wäre die Ableitung der Klassen *Wischermotor* und *Wischwasserpumpe* aus dem Modell *Kleinantrieb*. Beide Klassen basieren somit auf dem gleichen Modell, können aber andere Modellparameter haben, z. B. unterschiedliche Leistungen. Ein Knoten im Netzmodell ist die Instanziierung einer Komponente aus einer Komponentenklasse. So ist es z. B. möglich, aus der Klasse *Blinker* zwei Komponenten *Blinker links* und *Blinker rechts* abzuleiten.

Alle verfügbaren Komponentenklassen sind in einer XML-Datei hinterlegt. Diese Datei wird von Avanti eingelesen und die Klassen werden dem Anwender im Kontextmenü der Knoten angezeigt. Er kann die gewünschte Klasse auswählen und leitet damit eine Komponente aus dieser Komponentenklasse ab. Der Quelltext 6.2 zeigt beispielhaft den Eintrag für den Bordnetzwaner in der XML-Datei. Jeder Komponentenklasse ist über den Schlüssel *class_id* eine eindeutige, maximal dreistellige ID zugewiesen. Bei der Instanziierung wird der ID eine fortlaufende, dreistellige Nummer angehängt, so dass jeder Knoten im Netzmodell über eine vier- bis sechsstellige Nummer eindeutig identifizierbar ist. Im Schlüssel *model* ist der Modellname, von dem die Klasse abgeleitet wird, angegeben. Anschließend wird ein Komponentenna-me definiert, der der instanziierten Komponente als Standardwert zugewiesen wird. Der Anwender kann diesen Namen anschließend beliebig anpassen. Der Schlüssel *library* verweist auf die Bibliothek, in dem das Modell abgelegt wird und über den Schlüssel *knotentyp* wird festgelegt, ob es sich bei der Klasse um eine Quelle, einen

```

1 <komponentenklasse>
2   <ident>
3     <class_id>17</class_id>
4     <model>bordnetzwanandler</model>
5     <componentname>"Bordnetzwanandler"</componentname>
6     <library>"VHDL_KOMPONENTEN.SMD"\$17</library>
7     <knotentyp>verteiler</knotentyp>
8   </ident>
9   <ports>
10    <cons>bordnetz</cons>
11    <cons>traktionsnetz</cons>
12    <cons>gnd</cons>
13    <in>
14      <in_name>schalter:=1</in_name>
15      <in_steps>0</in_steps>
16    </in>
17    <out>u_bordnetz</out>
18    <out>i_bordnetz</out>
19    <out>u_traktionsnetz</out>
20    <out>i_traktionsnetz</out>
21  </ports>
22  <level>
23    <entry>"70A_kennlinie"</entry>
24    <entry>"75A_kennlinie"</entry>
25    <entry>"80A_kennlinie"</entry>
26  </level>
27 </komponentenklasse>

```

Quelltext 6.2: Definition einer Komponente

Speicher, einen Verteiler oder einen Verbraucher handelt. Die folgenden Schlüssel definieren konservative Knoten, sowie Ein- und Ausgangsgrößen des referenzier-ten Modells. Im vorliegenden Beispiel werden zunächst die drei konservative Knoten *bordnetz*, *traktionsnetz* und *gnd* definiert. Anschließend erfolgt die Definition der Eingangsgröße *schalter*. Zugleich wird der Standardwert definiert, der dieser Größe zugewiesen wird, wenn keine anderen Angaben im Netzmodell oder anderen Programmteilen von Avanti gemacht werden. Mit dem Schlüssel *in_steps* wird festgelegt, ob diese Eingangsgröße von den Insassen beeinflusst werden kann. Dabei gilt folgende Zuordnung:

- 0** nicht von den Insassen steuerbar
- 1** stufenlos steuerbar

n > 1 n-1 Schaltstufen und Auszustand

Der Bordnetzwan­dler lässt sich nach dieser Zuordnung nicht von den Insassen beeinflussen und ist standardmäßig eingeschaltet. Die vier folgenden Schlüssel definieren die Ausgangsgrößen des Modells. Diese können später von Avanti zur Analyse des Simulationsergebnisses genutzt werden. Wie in Abschnitt 5.1.7 beschrieben, können in einem Modell mehrere Detaillierungsgrade abgebildet werden. Zusätzlich lässt sich diese Funktion nutzen, um verschiedene Modellvarianten abzulegen. Im Beispiel sind dies die Kennlinien unterschiedlicher Wandlertypen, die in den letzten drei Schlüsseln definiert werden. Der gewünschte Detaillierungsgrad kann im Kontextmenü eines Netzmodellknotens ausgewählt werden.

Neben der Komponentenklasse und des Detaillierungsgrades kann der Anwender die konservativen Knoten und die Ein- und Ausgangsgrößen der Komponente konfigurieren. Jeder konservative Knoten muss einer Kante im Netzmodell zugewiesen werden, sofern die Zuordnung nicht eindeutig bestimmt ist. Alle Knoten mit dem Namen *gnd* (Masseknoten) werden von Avanti automatisch miteinander verbunden, ihnen wird keine Kante zugewiesen. Ist neben dem Masseknoten nur ein weiterer konservativer Knoten vorhanden, so ist die Zuordnung zu einer Kante eindeutig und muss nicht konfiguriert werden. Einige Komponenten besitzen jedoch mehr konservative Knoten, z. B. der vorher bereits erwähnte Bordnetzwan­dler. Hier muss der Anwender dem konservativen Knoten die entsprechende Kante des Netzmodells zuweisen. Um eine Komponente während der Simulation zu steuern und um später Ausgangsgrößen der Komponente zu analysieren, müssen diese mit der in Abschnitt 6.4.2.1 beschriebenen Schnittstelle verbunden werden. Dazu stellt Avanti dem Anwender im Kontextmenü des jeweiligen Netz­knotens alle Ein- und Ausgänge des dahinterliegenden Modells dar. In einer Liste kann er dann einen freien Port der Schnittstelle mit dem Ein- bzw. Ausgang verbinden. Bei Eingangsgrößen ist es zudem möglich, einen festen Wert zuzuweisen, z. B. die Spannung bei einer Spannungsquelle, wenn diese über die Simulationszeit konstant bleiben soll. Eingangsgrößen, die in der Klassendefinition als steuerbar definiert sind und denen ein Port der Schnittstelle zugewiesen wurde, lässt sich anschließend ein Aktivierungsmuster zuweisen (siehe Abschnitt 6.4.4).

6.4.4 Generierung von Szenarien

Auf das Fahrzeug wirken im Betrieb viele äußere Einflüsse. Dazu gehören im Wesentlichen:

- Verhalten der Insassen (Aktivierung von Komfortsystemen)
- Klimatische Bedingungen (Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung)

- Fahrzyklus (Geschwindigkeit, Steigung, Lenkwinkel)

Diese Daten müssen bei einer Simulation berücksichtigt werden, da sie auf das energetische Verhalten des Fahrzeugbordnetzes direkt und indirekt Einfluss nehmen. Beispielsweise beeinflusst die Außentemperatur in großem Maße die Leistungsaufnahme der Kühlsysteme. Zur Erfassung dieser Daten wurden daher entsprechende Eingabemasken in Avanti implementiert, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Insassen eines Fahrzeugs können eine Vielzahl von Komponenten bedienen, die Einfluss auf das Bordnetz haben. Dazu gehören z. B. Komfortsysteme wie Sitzheizungen oder auch sicherheitsrelevante Systeme wie Scheinwerfer oder die Heckscheibenheizung. Die in Abbildung 6.22 dargestellte Eingabemaske ermöglicht dem Anwender, für jede von den Insassen bedienbare und im Energienetz eingebundene Komponente ein Aktivierungsmuster vorzugeben. Dazu sind diese Komponenten in

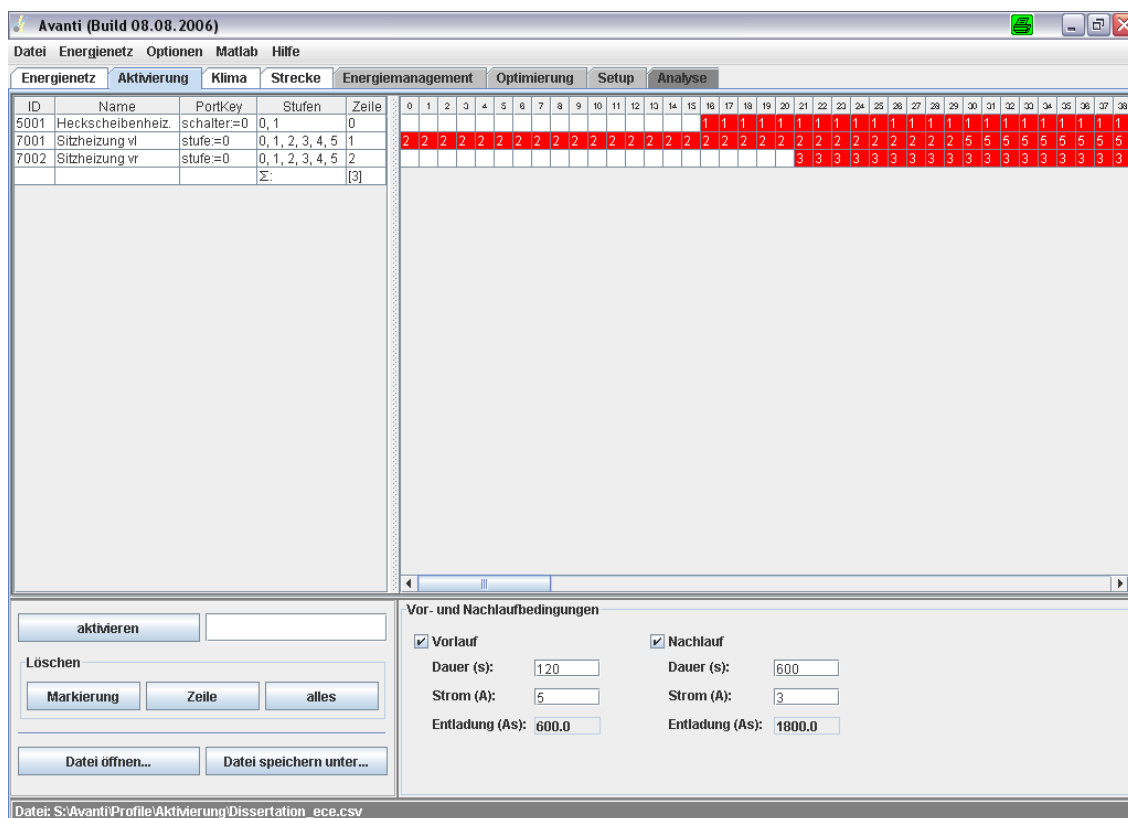


Abbildung 6.22: Eingabemaske für die Komponentenaktivierung

einer Liste aufgeführt (links). In die Matrix auf der rechten Seite kann für diskrete Zeitpunkte im Abstand von jeweils einer Sekunde ein Aktivierungswert eingetragen werden. In Abbildung 6.22 ist beispielsweise die *Sitzheizung vl* von Anfang an auf Stufe 2 geschaltet, während die *Sitzheizung vr* nach 20 Sekunden auf Stufe 3 geschaltet wird.

Neben der Aktivierung von Komponenten können in dieser Maske zusätzlich noch Vor- und Nachlaufeigenschaften definiert werden. Dazu können jeweils die Dauer und der aus der Batterie entnommene Strom eingegeben werden. Avanti berechnet daraus die aus der Batterie entnommene Ladung. Die Vorlauf-Entladung wird dann vor Simulationsstart vom Anfangsladezustand der Batterie abgezogen. Die Nachlaufentladung wird dementsprechend nach der Simulation berücksichtigt.

Neben den Insassen beeinflussen auch die klimatischen Bedingungen das energetische Verhalten des Bordnetzes. Im Sommer benötigen z. B. die Kühlsysteme mehr Energie als im Winter, und Scheibenwischer, die von einem Regensensor angesteuert werden, arbeiten bei starkem Regen mehr als bei geringen Niederschlägen. Um die klimatischen Bedingungen in der Simulation zu berücksichtigen, wurde in Avanti eine weitere Eingabemaske vorgesehen, die in Abbildung 6.23 zu sehen ist. Der Anwender hat hier die Möglichkeit, für folgende Parameter Kennlinien zu hinterlegen:

- Außentemperatur
- Innentemperatur
- Sonneneinstrahlung
- Niederschlag
- Luftfeuchtigkeit

Mit einer weiteren Eingabemaske kann der Anwender die Streckenparameter festlegen. Dazu gehören:

- Geschwindigkeitsprofil
- Höhenprofil
- Lenkwinkelprofil

In Abbildung 6.24 ist diese Maske zu sehen. Sie hat im Wesentlichen den gleichen Aufbau wie die Eingabemaske für die klimatischen Bedingungen. Zusätzlich bietet sie die Möglichkeit, Geschwindigkeits- und Höhenprofile aus einem GPS³-Logfile zu

³Das Global Positioning System (GPS) ist ein satellitengestütztes Navigationssystem des US-Verteidigungsministeriums zur weltweiten Positionsbestimmung. Das GPS war ursprünglich zur Positionsbestimmung und Navigation im militärischen Bereich vorgesehen. Heute wird es jedoch hauptsächlich im zivilen Bereich genutzt. [108]

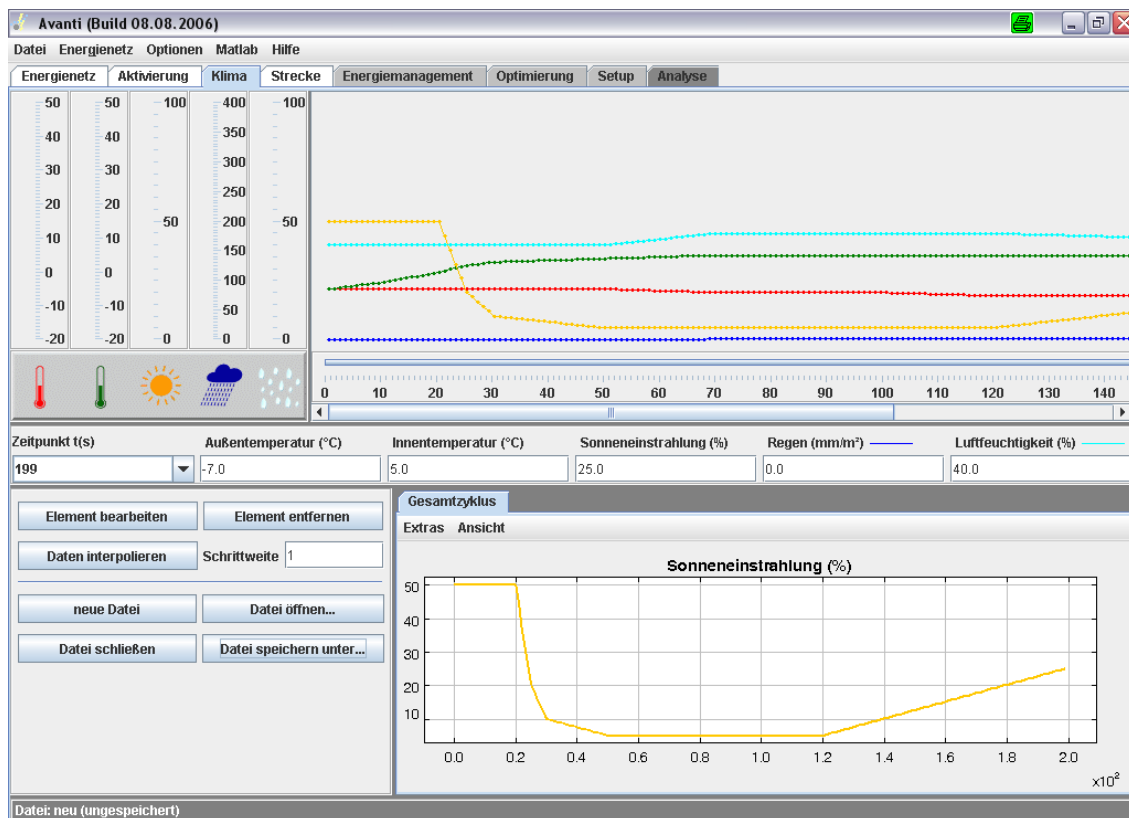


Abbildung 6.23: Eingabemaske für die klimatischen Bedingungen

importieren. Die GPS-Daten müssen dabei im NMEA 0183⁴-Format vorliegen. Diese Funktion ist nützlich, wenn Messfahrten mit einem GPS-Gerät aufgenommen wurden und später als Basis für eine Simulation dienen sollen.

6.4.5 Randbedingungen

Zusätzlich zum Netzmodell, dem Aktivierungsmuster und den Klima- und Streckenprofilen kann der Anwender Randbedingungen vorgeben, die das simulierte Energienetz erfüllen soll. Die Eingabemaske dafür ist in Abbildung 6.25 zu sehen. Die Randbedingungen sind in die drei Kategorien *Fahrzeug*, *Batterie* und *Bordnetz*-

⁴Die National Marine Electronics Association (NMEA) ist eine US-amerikanische Vereinigung von Elektronikherstellern und -händlern der Schifffahrtsindustrie. Ihre Hauptziele sind die Förderung von Standards und technischen Entwicklungen in der Marineelektronik sowie die technische Weiterbildung ihrer Mitglieder. Der NMEA-Standard ist ein Übertragungsstandard im maritimen Bereich, dessen Hauptanwendung die Weitergabe von Positionsdaten eines weltweiten Navigationssatellitensystems an andere Geräte ist. Die meisten GPS-Empfänger geben Daten in diesem Format aus. [110]

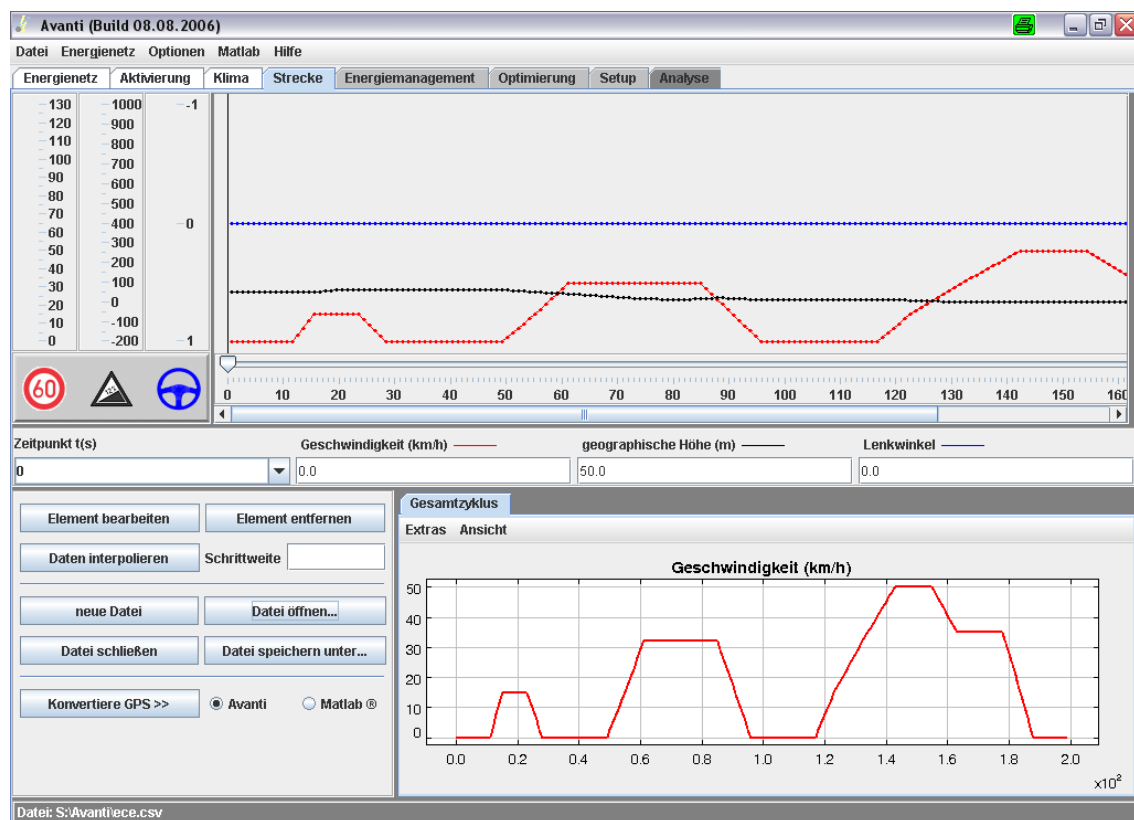


Abbildung 6.24: Eingabemaske für die Streckenparameter

spannung aufgeteilt und lassen sich vom Anwender beliebig konfigurieren. Folgende Randbedingungen sind konfigurierbar:

- Fahrzeug
 - **Fahrzeuglebensdauer (Jahre)** Die Fahrzeuglebensdauer kennzeichnet die Dauer in Jahren, über welche ein Fahrzeug betrieben wird. Die Dauer versteht sich als Bruttowert, da sie neben der Fahrzeit auch die Standzeit einschließt.
 - **Fahrten pro Tag** Die Anzahl der Fahrten pro Tag wird für die Berechnung der Batteriezyklisierung benötigt. Eine höhere Anzahl Fahrten pro Tag bedeutet eine stärkere Batteriezyklisierung und somit eine höhere Mindestbatteriekapazität.
- Batterie
 - **geforderte Batterielebensdauer (Jahre)** Dieser Wert ist eine Forderung an die Haltbarkeit einer Batterie. Eine höhere, geforderte Batterielebensdauer bedeutet, dass die Batterie über einen längeren Zeitraum der Zyklisierung

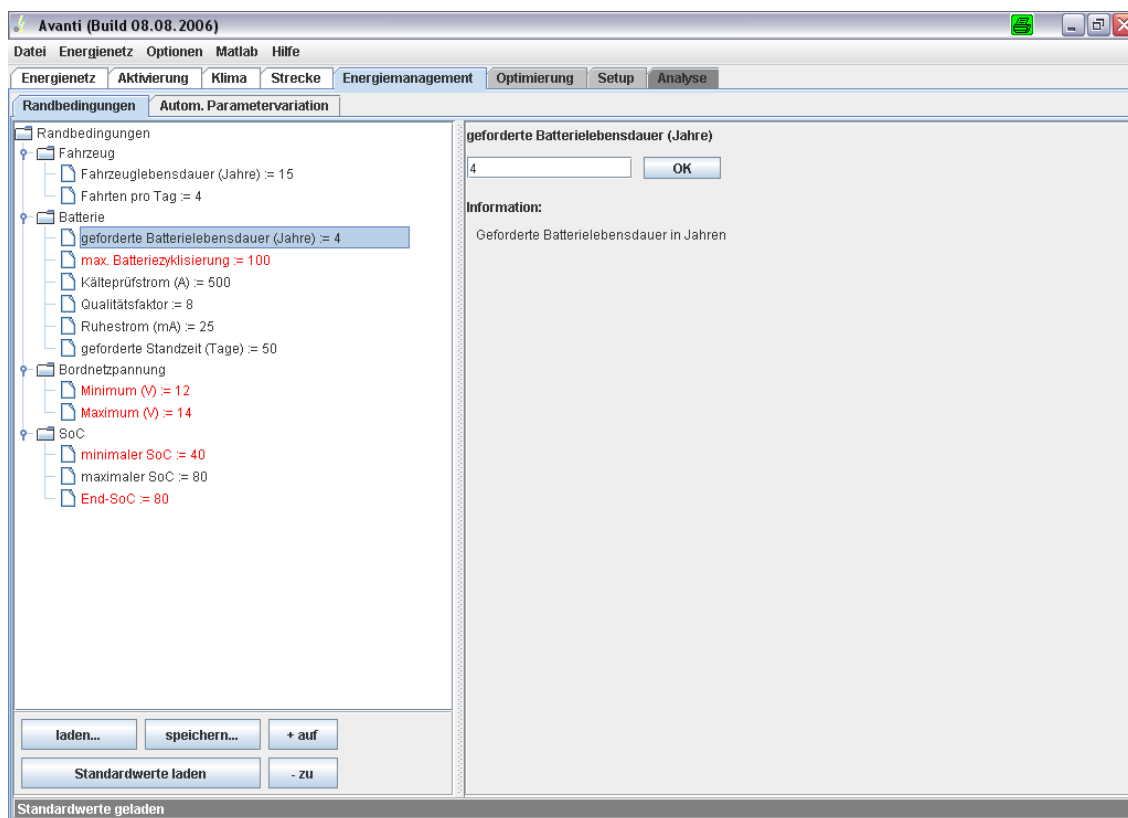


Abbildung 6.25: Eingabemaske für die Randbedingungen

durch die Entladung während der Fahr- und Standzeit ausgesetzt ist, was in einer größeren Mindestkapazität resultiert.

- **max. Batteriezyklisierung** Die maximale Batteriezyklisierung ist die Vorgabe eines Faktors, der die Anzahl der Ladezyklen beschreibt, für die eine Batterie ausgelegt ist.
- **Kälteprüfstrom (A)** Der Kälteprüfstrom ist der vom Hersteller angegebene Entladestrom I_{cc} , der von einer Batterie bei -18 °C und einer Mindestspannung von $U_i=7,5\text{ V}$ für die Dauer von 10 Sekunden abgegeben wird. Das Prüfverfahren wird in der EN beschrieben.
- **Qualitätsfaktor** Bei führenden Herstellern kann beobachtet werden, dass der Kälteprüfstrom abhängig von der Batteriekapazität und der Batteriequalität, bzw. dem Batteriepreis ist. Dabei gilt, dass mit steigender Qualität, bzw. Preis der Kälteprüfstrom bei gleicher Kapazität steigt. Dieser wird als Qualitätsfaktor QF bezeichnet und ist als Quotient aus Kälteprüfstrom und Batteriekapazität definiert worden, der abhängig von der Batteriequalität ist.

- **Ruhestrom (mA)** Als Ruhestrom bezeichnet man den Strom, der im Bordnetz fließt, während sich das Fahrzeug im Stillstand befindet. Durch die dauerhafte Ladungsentnahme wird die Batterie zyklisiert. Außerdem ist diese Größe ausschlaggebend für die Wiederstartfähigkeit des Fahrzeugs bei einer langen Standzeit.
- **geforderte Standzeit (Tage)** Die Anforderung an die Wiederstartfähigkeit des Fahrzeugs kann mit der Angabe der geforderten Standzeit variiert werden. Eine hohe geforderte Standzeit hat eine große Mindestbatteriekapazität zur Folge.
- Bordnetzspannung
 - **Minimum (V)** Die minimale Bordnetzspannung ist eine überprüfbare Randbedingung, die während eines Fahrzyklus nicht unterschritten werden soll.
 - **Maximum (V)** Die maximale Bordnetzspannung ist eine überprüfbare Randbedingung, die während eines Fahrzyklus nicht überschritten werden soll.
- SoC
 - **minimaler SoC** Als minimaler SoC wird der Wert bezeichnet, bei dem das Fahrzeug noch startfähig ist. und fließt als solcher in die Berechnung der Mindestbatteriekapazität ein. Ein Unterschreiten dieser Randbedingung kann nach der Simulation in der Analyse überprüft werden.
 - **maximaler SoC** Der maximale SoC ist der Wert, bei dem die Batterie des Fahrzeugs als voll definiert wird. Der Wert fließt in die Berechnung der Mindestbatteriekapazität ein.
 - **End-SoC** Eine Anforderung an den Ladezustand am Ende des Zyklus stellt dieser Wert dar. Die Überprüfung dieser Randbedingung kann in der Analyse vorgenommen werden.

Ein kompletter Randbedingungssatz kann zudem abgespeichert und geladen werden. Einige der Randbedingungen werden in der Analyse für die Berechnung der Batteriezyklisierung und der minimalen Batteriegröße benötigt, siehe hierzu Abschnitt 6.4.7. Die in Abbildung 6.25 rot markierten Randbedingungen werden nach der Simulation automatisch überprüft und das Ergebnis in einem Fenster dargestellt. Sie werden zudem für die automatische Optimierung (siehe Abschnitt 6.4.9) verwendet.

6.4.6 Simulation mit Avanti

Um eine Simulation mit Avanti durchzuführen, müssen zunächst das Netzmodell, die Komponentenaktivierung, die klimatischen Bedingungen und die Streckenparameter konfiguriert werden. Anschließend kann die Simulation in einer eigenen Eingabemaske erstellt, konfiguriert und gestartet werden. Diese Maske zeigt Abbildung 6.26. Mit den Bedienelementen auf der linken Seite können neue Simulationen

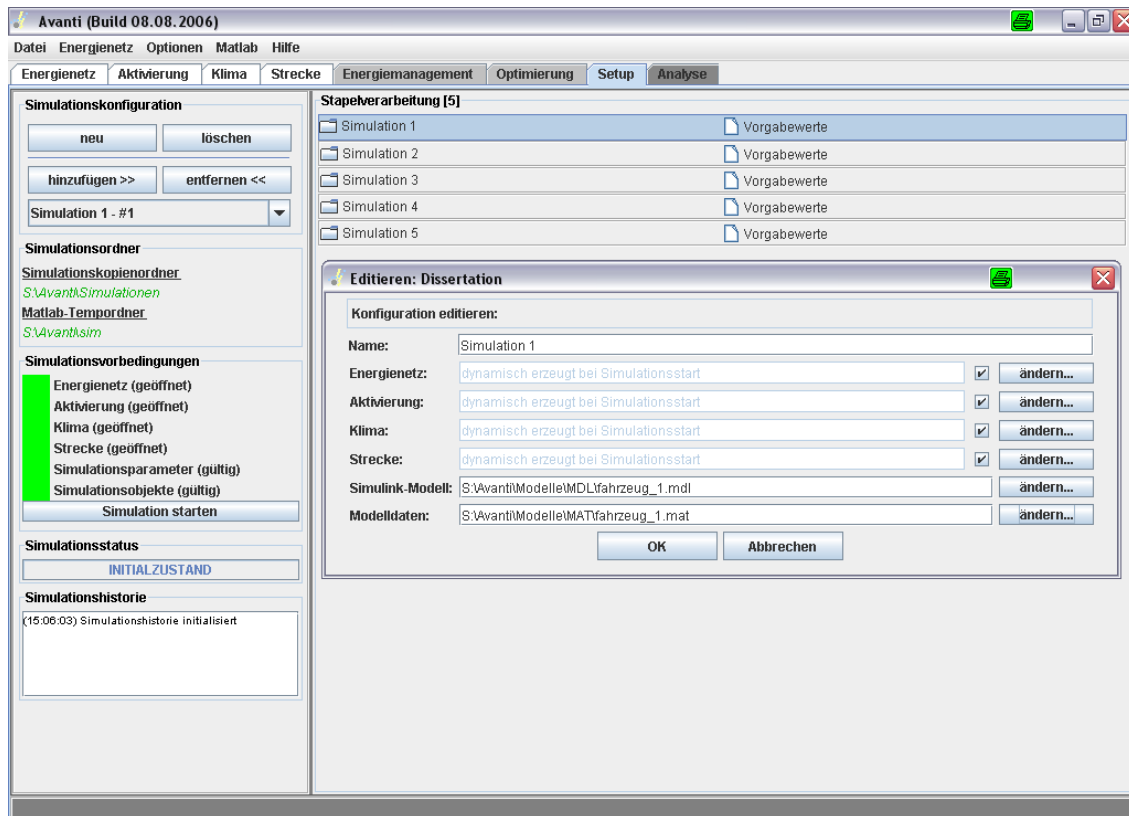


Abbildung 6.26: Eingabemaske für die Simulationskonfiguration

konfiguriert werden. Dazu wird ein Fenster geöffnet, in dem die Simulationsparameter eingestellt werden können. Es kann ein beliebiger Name für die Simulation vergeben werden. Zusätzlich werden die Eingangsdaten (Energienetz, Aktivierungsmuster, Klima- und Streckenprofil) für die Simulation konfiguriert. Es können entweder die in den Eingabemasken vorhandenen Daten oder bereits vorhandene Dateien ausgewählt werden. Zusätzlich wird noch das zu verwendende Simulink-Modell und eine zur Konfiguration dieses Modells benötigte Datendatei angegeben. Nach der Konfiguration der Simulation zeigt Avanti dem Anwender mittels grüner bzw. roter Felder an, ob alle Einstellungen korrekt sind (z. B. ob alle Dateien und Pfade existieren).

Beim anschließenden Start der Simulation werden zunächst die Eingabedaten exportiert. Das Energienetz und die Schnittstellenkonfiguration werden in ein Simulationsskript für Simplorer umgewandelt. Das Aktivierungsmuster, das Klima- und das Streckenprofil werden in CSV-Dateien exportiert. Anschließend wird Matlab gestartet, welches diese Dateien einliest und das in der Simulationskonfiguration angegebene Simulink-Modell öffnet und die eigentliche Co-Simulation startet. Dazu wird von Simulink aus der Simplorer-Simulator gestartet, der zunächst das von Avanti erzeugte Simulationsskript kompiliert. Anschließend beginnt die Co-Simulation, nach deren Ende die Simulationsergebnisse exportiert werden. Avanti kann die Ergebnisse anschließend einlesen und analysieren, siehe hierzu Abschnitt 6.4.7.

Wie in Abbildung 6.26 zu sehen, gestattet Avanti die Konfiguration mehrerer Simulationen, die anschließend nacheinander abgearbeitet werden. So können ohne Benutzereingriff auch z. B. über mehrere Tage hinweg Simulationen durchgeführt werden.

6.4.7 Analyse von Simulationsergebnissen

Die bei einer Simulation gewonnenen Daten können von Avanti innerhalb einer eigenen Maske analysiert werden. Avanti bietet dazu verschiedene Funktionen an. Alle im Ergebnis vorhandenen Signale können grafisch dargestellt werden. Dazu wurde das Programmpaket *ptplot*⁵ in Avanti eingebunden. Zusätzlich berechnet Avanti je nach Signaltyp bestimmte Kenngrößen. Einige Kenngrößen stehen für alle Bordnetz-Komponenten zur Verfügung, andere nur für ganz bestimmte.

6.4.7.1 Kenngrößen einzelner Komponenten

- **Minimaler Signalmesswert s_{min}**
Maßeinheit: je nach Komponente (z. B. Ampere, Volt etc.)
Betrifft: alle Komponenten
Berechnung: Der minimal Signalmesswert ist das Minimum des Ausgangssignales $s(t)$.
- **Maximaler Signalmesswert s_{min}**
Maßeinheit: je nach Komponente (z. B. Ampere, Volt etc.)
Betrifft: alle Komponenten
Berechnung: Der maximale Signalmesswert ist das Maximum des Ausgangssignales $s(t)$.

⁵ptplot ist ein 2D Digitalplotter- und Histogrammwerkzeug, das in Java implementiert ist.

- **Durchschnittlicher Signalmesswert \bar{s}**

Maßeinheit: je nach Komponente (z. B. Ampere, Volt etc.)

Betrifft: alle Komponenten

Berechnung: Der durchschnittliche Signalmesswert ergibt sich direkt aus dem über die gesamte Zyklusdauer gemittelten Signal $s(t)$.

- **Minimale Leistung P_{min}**

Maßeinheit: W (Watt)

Betrifft: Komponenten, deren Ausgangsport den Stromverlauf wiedergeben.

Berechnung: Die minimale Leistung einer Komponente ergibt sich aus dem Produkt der Bordnetzspannung und des während eines Zeitintervalls minimalen Eingangsstroms.

- **Maximale Leistung P_{max}**

Maßeinheit: W (Watt)

Betrifft: Komponenten, deren Ausgangsport den Stromverlauf wiedergeben.

Berechnung: Die maximale Leistung einer Komponente ergibt sich aus dem Produkt der Bordnetzspannung und des während eines Zeitintervalls maximalen Eingangsstroms.

- **Durchschnittliche Leistung \bar{P}**

Maßeinheit: W (Watt)

Betrifft: Komponenten, deren Ausgangsport den Stromverlauf wiedergeben.

Berechnung: Die durchschnittliche Leistung einer Komponente ergibt sich aus dem Produkt der Bordnetzspannung und des während eines Zeitintervalls durchschnittlichen Eingangsstroms.

- **Belastungsgrad m**

Maßeinheit: -

Betrifft: Komponenten, deren Ausgangsport den Stromverlauf wiedergeben.

Berechnung: $m = \frac{\bar{P}}{P_{max}}$

Der Belastungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der durchschnittlichen Leistung zur maximale Leistung.

6.4.7.2 Funktionsgraphen

- **Signalverlauf $s(t)$**

Maßeinheit: je nach Komponente (z. B. Ampere, Volt etc.)

Betrifft: alle Komponenten

Berechnung: Die Werte können direkt aus dem Simulationsergebnis abgelesen werden.

- **Wirkungsgrad $\eta(t)$**

Maßeinheit: -

Betrifft: Verteiler, dessen Ausgangsports die Rollen $U_{Bordnetz}$ und $I_{Bordnetz}$ sowie $U_{Traktionsnetz}$ und $I_{Traktionsnetz}$ zugewiesen wurden

Berechnung:
$$\eta = \frac{\sum_i \Delta \dot{W}_i}{\sum_j \Delta \dot{W}_j}$$

Der Wirkungsgrad berechnet sich aus der Summe der konsumierten Energie, abgeleitet nach der Zeit t , geteilt durch die Summe des Energieangebots, abgeleitet nach der Zeit t . Das entspricht dem Verhältnis der abgegebenen Leistung P_{ab} zur zugeführten Leistung P_{zu} . Da die abgeführte Leistung nicht größer als die zugeführte sein kann, ergibt sich ein Wert zwischen 0 und 1.

In diesem Fall kann der Verlauf des Wirkungsgrades berechnet werden über die Formel:

$$\eta(t) = \frac{U_{Bordnetz} \cdot I_{Bordnetz}}{U_{Traktionsnetz} \cdot I_{Traktionsnetz}}$$

- **Relative Häufigkeitsverteilung (Histogramm)**

x-Achse: relative Häufigkeiten (%) als Näherung für die Wahrscheinlichkeitsdichte

y-Achse: Signal-Messwerte

Betrifft: alle Komponenten

Berechnung: Bei einem relativen Histogramm wird der gesamte intervall in k Klassen aufgeteilt. In Avanti sind diese Klassen gleich breit, was die Interpretation vereinfacht. Über jeder Klasse wird ein Rechteck errichtet, dessen Fläche proportional zur klassenspezifischen Häufigkeit ist.

- **Relative Summenhäufigkeit (Verteilungsfunktion)**

x-Achse: relative Häufigkeiten (%) als Näherung für die Verteilungsfunktion

y-Achse: Signal-Messwerte

Betrifft: alle Komponenten

Berechnung: Durch Summation der relativen Häufigkeiten (s.o.) erhält man die relative Summenhäufigkeiten. Werden diese Werte in den oberen Klassengrenzen aufgetragen und als Parallele nach rechts fortgesetzt, dann ergibt sich eine graphische Darstellung, die als Näherung für die Verteilungsfunktion aufgefasst werden kann.

In Abbildung 6.27 sind beispielhaft ein Temperatur- und ein Spannungssignal sowie eine Häufigkeitsverteilung abgebildet.

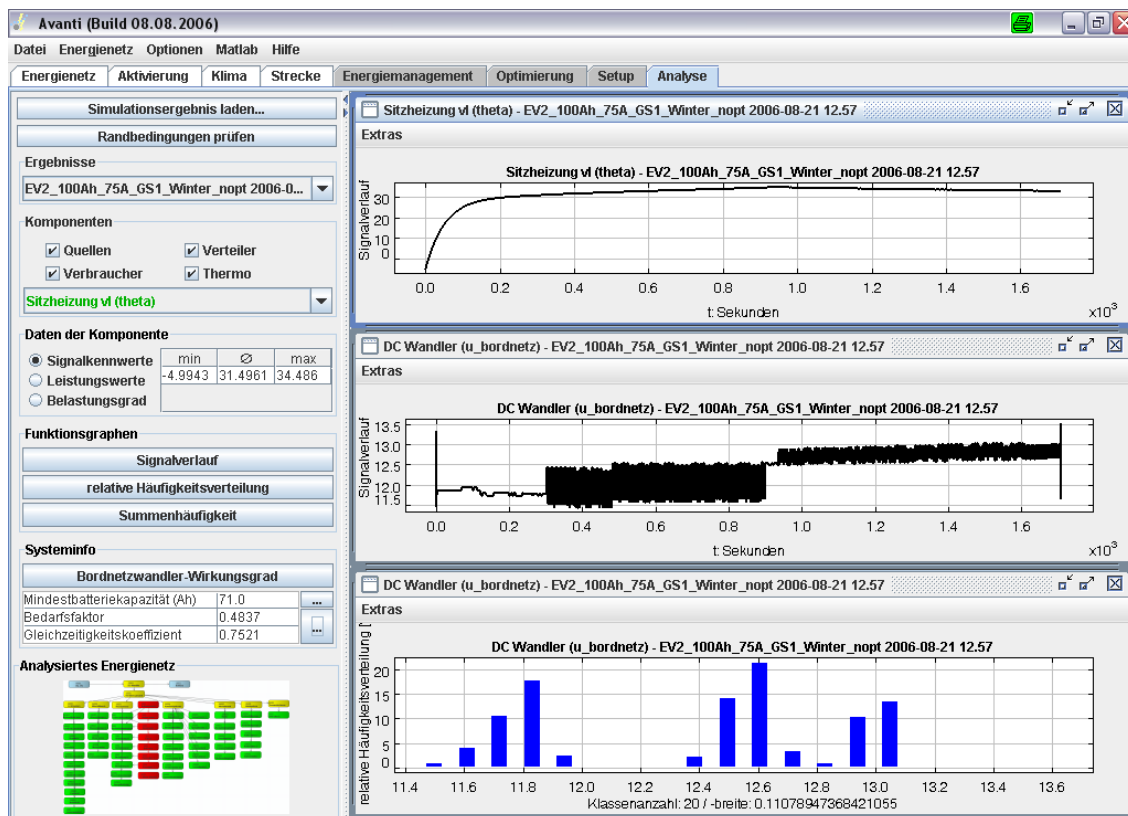


Abbildung 6.27: Analyse

6.4.7.3 Kenngrößen des Gesamtnetzes

Zur Analyse des Gesamtsystems berechnet Avanti die Kenngrößen *Gleichzeitigkeitskoeffizient* (GZK) und *Bedarfsfaktor* (BF), die im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert wurden: Der GZK ist als Quotient aus der im Zyklus maximal im Bordnetz aufgetretenden Leistung und der Summe der maximalen Leistungen der Einzelkomponenten ein Maß für die Gleichmäßigkeit der im Bordnetz umgesetzten Leistung:

$$GZK = \frac{P_{max,Gesamtnetz}}{\sum_i P_{max,i}} \quad (6.3)$$

Abbildung 6.28 zeigt dies an zwei Beispielen. Im ersten Fall treten bei zwei Komponenten gleichzeitig Leistungsspitzen auf. Daraus ergibt sich ein GZK von 1. Im zweiten Fall sind die Leistungsspitzen gegeneinander verschoben, wodurch der GZK auf 0,5 fällt. Je geringer der GZK, desto gleichmäßiger ist die Leistungsanforderung über die Zeit verteilt.

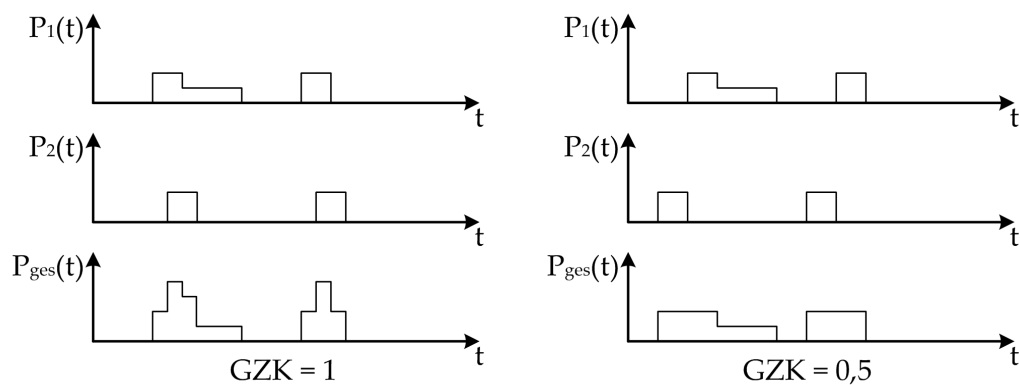


Abbildung 6.28: Erläuterung des Gleichzeitigkeitskoeffizienten

Der BF wurde definiert als das Verhältnis zwischen der Summe der maximalen Leistungen der Einzelkomponenten und der Summe der Nennleistungen aller Einzelkomponenten:

$$BF = \frac{\sum_i P_{max,i}}{\sum_i P_{nenn,i}} \quad (6.4)$$

Er ist ein Maß dafür, wieviel der installierten Leistung maximal in einem Zyklus tatsächlich in Anspruch genommen wird.

6.4.7.4 Batteriezyklisierung

Eine weitere wichtige Funktionalität bildet die Berechnung der Batteriezyklisierung (zusammengesetzt aus Ruhestrom-, Vor- und Nachlauf- und Fahrbetriebzyklisierung) und der benötigten Batteriegröße. Dazu wurde ein eigener Dialog erstellt, wie er in Abbildung 6.29 zu sehen ist. Die Berechnung der Batteriezyklisierung erfor-

The screenshot shows a software window titled 'Batteriekapazität (EV2_100Ah_75A_GS1_Winter_r...)'. It has three tabs: '[1] Kaltstartverhalten', '[2] Zyklische Belastung' (which is active), and '[3] Fahrzeugstillstand'. The main area is titled 'Batteriezyklisierung berechnen:' and contains the following data:

Fahrzeublebensdauer:	15	Jahre
Betriebszeit:	5195.17	Stunden
Fahrzeit pro Jahr:	346.34	Stunden
Fahrzeit pro Tag:	0.95	Stunden
Fahrdauer pro Fahrt:	28.47	Minuten
Fahrten pro Tag:	2	
Geforderte Batterielebensdauer:	4	Jahre
Fahrzeit während Batterielebensdauer:	1385.38	Stunden
Ruhestrom:	20	mA
(I) Zyklisierung durch Ruhestrom:	168.2731	Ah/Jahr
(II) Zyklisierung durch Vor- und Nachlauf:	0.0	Ah/Fahrt
Fahrzeugbatterie:	Batterie (I_in)	
(III) Zyklisierung während Fahrt:	2.1949	Ah/Fahrt
Gesamtzyklisierung (I+II+III):	7082.09	Ah
max. Batteriezyklisierung (Faktor)	100	
>>> Mindestkapazität	71.0	Ah

At the bottom, there is a 'Schließen' button.

Abbildung 6.29: Auswertung der Batteriezyklisierung

det einige Eingangsdaten, die zum einen aus den Simulationsergebnissen entnommen werden und zum anderen vom Anwender vorgegeben werden müssen. Sie sind in Tabelle 6.6 aufgelistet: Die Berechnung der Zyklisierung für die gesamte geforderte Batterielebensdauer erfolgt nach den folgenden Gleichungen. Dabei werden die drei Teilzyklisierungen $Z_{\text{Betrieb,Tag}}$ (Zyklisierung pro Tag durch die Fahrzy-

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Herkunft
t_{Zyk}	Zyklusdauer	s	Anwender
n_{Zyk}	Zyklenanzahl pro Tag	1	Anwender
Z_{Zyk}	Zyklisierung während eines Zyklus	Ah	Simulation
t_{Bat}	geforderte Batteriebensdauer	Jahre	Anwender
I_{Ruh}	Ruhestrom	mA	Anwender
t_{Vor}	Vorlaufdauer	s	Anwender
t_{Nach}	Nachlaufdauer	s	Anwender
I_{Vor}	Vorlaufstrom	A	Anwender
I_{Nach}	Nachlaufstrom	A	Anwender

Tabelle 6.6: Parameter für die Berechnung der Batteriezyklisierung

klen), $Z_{VorNach,Tag}$ (Zyklisierung durch Vor- und Nachlauf) und $Z_{Ruh,Tag}$ (Zyklisierung durch den Ruhestrom) berechnet und addiert.

$$Z_{gesamt} = t_{Bat} \cdot 365 \cdot (Z_{Betrieb,Tag} + Z_{VorNach,Tag} + Z_{Ruh,Tag}) \quad (6.5)$$

$$Z_{Betrieb,Tag} = n_{Zyk} \cdot Z_{Zyk} \quad (6.6)$$

$$Z_{VorNach,Tag} = Z_{Vor,Tag} + Z_{Nach,Tag} \quad (6.7)$$

$$= n_{Zyk} \cdot (Z_{Vor} + Z_{Nach}) \quad (6.8)$$

$$= n_{Zyk} \cdot (I_{Vor} \cdot \frac{t_{Vor}}{3600} + I_{Nach} \cdot \frac{t_{Nach}}{3600}) \quad (6.9)$$

$$Z_{Ruh,Tag} = \frac{I_{Ruh}}{1000} \cdot t_{Ruh,Tag} \quad (6.10)$$

$$= \frac{I_{Ruh}}{1000} \cdot (24 \text{ h} - n_{Zyk} \cdot \frac{t_{Zyk} + t_{Vor} + t_{Nach}}{3600}) \quad (6.11)$$

Im zweiten Schritt wird die benötigte Batteriegröße C_{Bat} berechnet. Dazu muss vom Anwender ein Zyklisierungsfaktor f_{Zyk} angegeben werden. Dieser Faktor beschreibt, wie oft die Batterie während ihrer Lebensdauer vollständig ent- und geladen werden darf. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$C_{Bat} \geq \frac{Z_{gesamt}}{f_{Zyk}} \quad (6.12)$$

Allerdings wird die benötigte Batteriekapazität nicht nur von der Zyklisierung, die während des normalen Fahrbetriebs (mit normalen Standzeiten) auftritt, bestimmt, sondern zusätzlich von Kaltstart- und Ruhestromanforderungen. Für die Kaltstartanforderungen ist der Kälteprüfstrom I_{cc} der Batterie entscheidend. Eine Recherche

bei den führenden Batterieherstellern hat ergeben, dass dieser abhängig von der Batteriekapazität und der Batteriequalität ist. Dabei gilt, dass mit steigender Qualität der Kälteprüfstrom bei gleicher Kapazität steigt. So konnte ein Qualitätsfaktor QF als Quotient aus Kälteprüfstrom und Batteriekapazität definiert werden, der abhängig von der Batteriequalität ist. In Tabelle 6.7 sind diese Zusammenhänge am Beispiel einer Batterie mit 45 Ah dargestellt. Durch Angabe des benötigten Kälteprüfstromes

Kapazität	Kälteprüfstrom	Preisklasse	Qualitätsfaktor
45 Ah	270 A	Low Budget	6
45 Ah	360 A	Standard	8
45 Ah	450 A	Premium	10

Tabelle 6.7: Kälteprüfstrom in Abhängigkeit von der Batteriequalität

und der gewünschten Batteriequalität lässt sich somit die benötigte Batteriekapazität errechnen:

$$C_{Bat} \geq \frac{I_{cc}}{QF} \quad (6.13)$$

Die Ruhestromanforderungen ergeben sich aus einer geforderten Mindeststandzeit t_{Stand} (in Tagen) ohne Fahrbetrieb. Diese Standzeit beginnt beim Abstellen des Fahrzeugs. Daher muss für die Standzeitzyklisierung Z_{Stand} zusätzlich noch eine Nachlaufzyklisierung (siehe Gleichung 6.9) berücksichtigt werden. Neben der Entladung durch den Ruhestrom hat die Batterie zusätzlich noch eine Selbstentladung, die zu 0,1 % der Nennkapazität pro Tag angenommen wird.

$$Z_{Stand} = I_{Ruh} \cdot 24 \cdot t_{Stand} + Z_{Nach} + 0,001 \cdot C_{Bat} \cdot t_{Stand} \quad (6.14)$$

Zur Berechnung der Mindestbatteriekapazität müssen zwei weitere Randbedingungen berücksichtigt werden, der SOC der Batterie SOC_{Start} beim Abstellen des Fahrzeugs und der minimal erlaubte SOC nach der Standzeit SOC_{min} . Damit ergibt sich für die Mindestbatteriekapazität:

$$SOC_{Start} \cdot C_{Bat} - Z_{Stand} \geq SOC_{min} \cdot C_{Bat} \quad (6.15)$$

$$C_{Bat} \geq \frac{I_{Ruh} \cdot 24 \text{ h} \cdot t_{Stand} + Z_{Nach}}{SOC_{Start} - SOC_{min} - 0,001 \cdot t_{Stand}} \quad (6.16)$$

Aus dem Maximum der drei berechneten Batteriekapazitäten ergibt sich anschließend die Mindestgröße für die Bordnetzatterie.

6.4.8 Automatische Parametervariation

In Abschnitt 6.4.6 wurde bereits die Möglichkeit vorgestellt, mit Avanti automatisch mehrere Simulationen nacheinander abarbeiten zu lassen. Um die Simulationen noch weiter zu automatisieren, wurde in Avanti eine automatische Parametervariation implementiert, die in Abbildung 6.30 dargestellt ist. In dieser Eingabemaske können alle

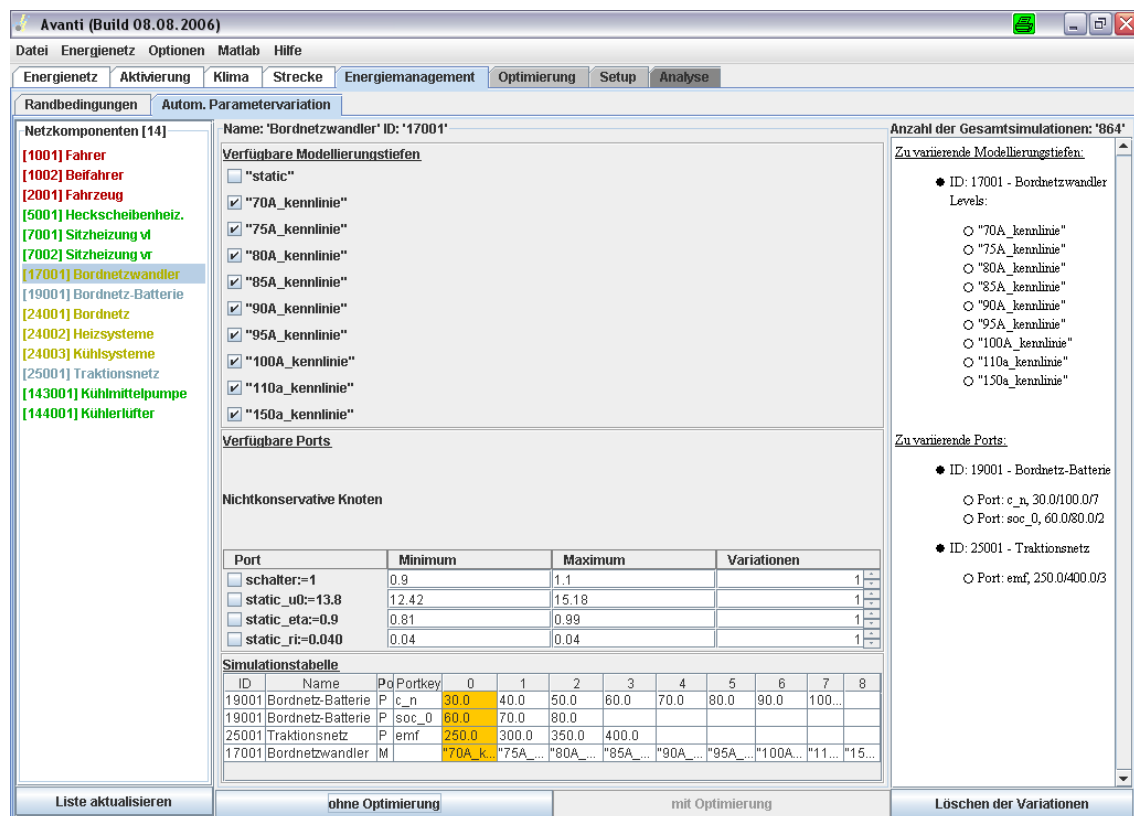


Abbildung 6.30: Eingabemaske für die automatische Parametervariation

Parameter und Detaillierungsgrade der im Netzmodell vorhandenen Komponenten für die automatische Variation ausgewählt werden. Im Beispiel wurden die folgenden Parameter und Modellvarianten ausgewählt:

- Nennkapazität der Bordnetzbatteie (Bordnetzbatterie.c_n)
- Anfangsladezustand der Bordnetzbatteie (Bordnetzbatterie.soc_0)
- Traktionsnetzspannung (Traktionsnetz.emf)
- Modellvariante des Bordnetzwandlers

Beim Start der automatischen Parametervariation erzeugt Avanti für alle Kombinationen der zu variierenden Parameter eine Simulation und reiht diese in die Simulationswarteschlange ein. Alle Simulationen werden anschließend automatisch abgearbeitet.

6.4.9 Optimierung

Avanti kann mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus (siehe Abschnitt 6.2.1) automatisch eine optimale Konfiguration für das Energienetz eines Fahrzeugs finden. Dabei können zwei Parameter gleichzeitig optimiert werden, z. B. die Batteriekapazität und der Ausgangsstrom des Bordnetzwandlers. Diese beiden Parameter spannen einen zweidimensionalen Werteraum auf. Für jede Kombination zweier Parameter gibt der Anwender eine Bewertung vor. Abbildung 6.31 zeigt eine solche Bewertungsmatrix für zwei Parameter, die im Bereich von $[30 \dots 100]$, bzw. $[60 \dots 140]$ variiert und für die entsprechende Bewertungen vorgegeben wurden. Ziel der Opti-

		Parameter 1							
		30	40	50	60	70	80	90	100
Parameter 2	60	99	96	91	84	75	64	51	36
	80	93	90	85	78	69	58	45	30
	100	85	82	77	70	61	50	37	22
	120	75	72	67	60	51	40	27	12
	140	63	60	55	48	39	28	15	0

Abbildung 6.31: Bewertungsmatrix für den Optimierungsalgorithmus

mierung ist es, innerhalb dieses Werteraums den Punkt zu finden, der die höchste Bewertung aufweist und gleichzeitig alle vorgegebenen Randbedingungen (siehe Abschnitt 6.4.5) einhält.

Die Bewertung der einzelnen Parameterkombinationen kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- **Ansteigende Zufallswerte:** Beginnend in der rechten unteren Ecke werden zeilenweise Zufallswerte aufsummiert.
- **Absteigende Zufallswerte:** Beginnend in der linken oberen werden zeilenweise Zufallswerte aufsummiert.

- **Zufallswerte:** Die Bewertungsmatrix wird mit voneinander unabhängigen Zufallswerten gefüllt.
- **Benutzerdefiniert:** Der Anwender kann in beliebige Zellen Werte eintragen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, automatisch Zellen durch lineare Interpolation zu füllen.
- **Generatorfunktion:** Der Benutzer kann die Parameter einer 2-dimensionalen Funktion definieren, die die Bewertungsmatrix mit Werten befüllt. Dies sind die fünf Parameter a , b , c , d und e der Funktion

$$f(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \quad (6.17)$$

In Abbildung 6.31 wurde dabei die Funktion

$$f(x, y) = -1 \cdot x^2 - 2 \cdot x - 1 \cdot y^2 - 5 \cdot x + 99 \quad (6.18)$$

mit dem Nullpunkt in der linken oberen Ecke der Matrix benutzt.

Die Suche nach dem Optimum erfolgt nun entsprechend des Metropolis-Algorithmus (siehe Abschnitt 6.2.1) und beginnt an einem beliebigen, vom Anwender wählbaren, Punkt im Werteraum. Es wird eine Simulation mit dem entsprechenden Parametersatz durchgeführt und anschließend analysiert. Werden die Randbedingungen an diesem Punkt eingehalten, so bleibt die Bewertungsmatrix unverändert. Werden eine oder mehrere Randbedingungen nicht eingehalten, so wird die Bewertung an diesem Punkt auf 0 zurückgesetzt. Anschließend werden alle (maximal acht, an den Rändern des Werteraums entsprechend weniger) *Nachbarn* des aktuellen Punktes mit jeweils einer Simulation überprüft (sofern der Punkt nicht bereits in einem vorhergehenden Schritt simuliert wurde) und anschließend, je nach Bewertung und Einhaltung der Randbedingungen ein neuer Punkt im Werteraum gesucht. Abbildung 6.32 zeigt diese Suche an einem Beispiel. Gestartet wurde hierbei an der Position (6, 3). Parameterkombinationen, die die Randbedingungen erfüllen, sind grün hinterlegt, nicht erfüllte Randbedingungen sich orange gekennzeichnet. Zu sehen ist hier ebenfalls die Möglichkeit des Metropolisalgorithmus, auch entgegen des positiven Gradienten weiter zu suchen (Sprung von (4, 3) nach (3, 4), von 70 auf 67).

Durch den Einsatz des Optimierungsalgorithmus war es in diesem Beispiel möglich, statt der insgesamt 40 Kombinationsmöglichkeiten nur 23 zu simulieren und damit die Rechenzeit annähernd zu halbieren. Eine weitere Reduzierung der notwendigen Simulationen kann erreicht werden, wenn der Algorithmus beim Simulieren der Nachbarpunkte diese entsprechend ihrer Bewertung sortiert und mit dem Nachbarn mit der höchsten Bewertung beginnt. Erfüllt dieser Nachbarpunkt die Randbedingungen, so können die Simulationen der weiteren Nachbarpunkte übersprungen werden. Dies führt zu einer wesentlich schnelleren Suche, wie in Abbildung 6.33 zu

		Parameter 1							
		30	40	50	60	70	80	90	100
Parameter 2	60	99	96	91	84	75	64	51	36
	80	93	90	85	78	69	58	45	30
	100	85	82	77	70	61	50	37	22
	120	75	72	67	60	51	40	27	12
	140	63	60	55	48	39	28	15	0

Abbildung 6.32: Beispiel für die Suche nach dem Optimum in der Bewertungsmatrix

		Parameter 1							
		30	40	50	60	70	80	90	100
Parameter 2	60	99	96	91	84	75	64	51	36
	80	93	90	85	78	69	58	45	30
	100	85	82	77	70	61	50	37	22
	120	75	72	67	60	51	40	27	12
	140	63	60	55	48	39	28	15	0

Abbildung 6.33: Beispiel für die Suche nach dem Optimum in der Bewertungsmatrix (modifizierter Algorithmus)

sehen ist. Statt der bisher 23 Simulationen sind hier nur noch 12 Simulationen notwendig.

Neben der hier gezeigten *harten* Überprüfung der Randbedingungen, d. h. es müssen alle Randbedingungen erfüllt sein, damit der Algorithmus den entsprechenden Punkt nicht mit 0 bewertet, kann alternativ eine *weiche* Überprüfung aktiviert werden:

Es seien n Randbedingungen definiert die bei der Optimierung berücksichtigt werden sollen. Die Simulation ergebe, dass m der n Randbedingungen erfüllt sind. Diese führt zu einer *Erfüllungsquote* Q_E von

$$Q_E = \frac{m}{n} \quad (6.19)$$

Zur Errechnung der endgültigen Bewertung B dieses Ergebnisses, wird dieser Wert mit einem Modifikator p potenziert und mit dem in der Bewertungsmatrix eingetragenen Wert B_{Matrix} multipliziert:

$$B = B_{Matrix} \cdot \left(\frac{m}{n}\right)^p \quad \text{mit} \quad p = 0.001 \dots 1000 \quad (6.20)$$

Je nach der Wahl von p kann die Randbedingungsprüfung so hart oder weich eingestellt werden. Die harte Randbedingungsprüfung entspricht dem Wert $p = 1000$, damit müssen alle Randbedingungen erfüllt sein, damit B nicht Null wird. Für $p = 0.001$ reicht die Erfüllung einer Randbedingung aus, um für B einen Wert von 1 zu erhalten.

In Abbildung 6.34 ist die grafische Oberfläche für die Optimierung dargestellt. In

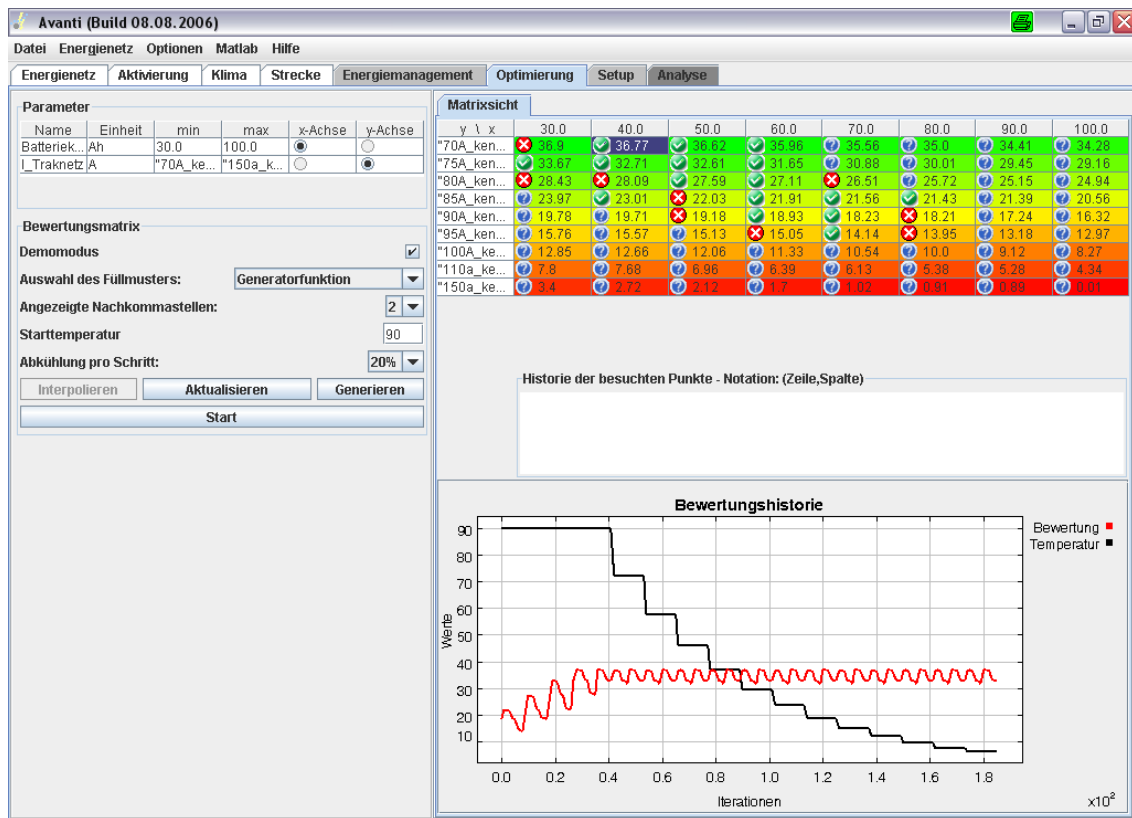


Abbildung 6.34: Eingabemaske für die Optimierung

diesem Beispiel wurden die zwei Parameter *Batteriegröße* und *Bordnetzwandlertyp* optimiert. In einem Kennfeld werden die Variationsmöglichkeiten dieser beiden Größen als x- und y-Achsen dargestellt und ihre Kombinationen bewertet.

6.4.10 Ausgabe eines elektronischen Lastenheftes

Avanti bietet die Möglichkeit, nach einer durchgeführten Optimierung ein Lastenheft auszugeben. Dieses kann dann als Basis für die Entwicklung der in der Simulation optimierten Bordnetzkomponenten genutzt werden. Das Lastenheft besteht aus drei Teilen:

1. Eingabeparameter
2. Optimierungsverlauf
3. Simulationsergebnisse

Im ersten Teil werden alle Eingabeparameter aufgeführt, die der Anwender für die Simulation eingeben hat. Dazu gehören:

- Energienetztopologie
- Komponentenaktivierung
- Klimaprofil
- Streckenprofil
- Randbedingungen für das Optimierungsproblem
- Variierte Modellparameter
- Bewertungsmatrix

Der zweite Teil des Lastenheftes stellt dar, welchen Weg der Optimierungsalgorithmus durch den Werteraum gegangen ist und ob die jeweiligen Simulationsergebnisse die Randbedingungen erfüllten bzw. welche Randbedingungen verletzt wurden. Im dritten Teil wird schließlich das Ergebnis der Optimierung dargestellt. Dazu gehören im Falle der Auslegung von Bordnetzwanler und Bordnetzbatterie:

- Dauer-Ausgangsstrom des Wandlers
- Maximal-Ausgangsstrom des Wandlers
- Spannungsbereiche des Wandlers
- Kapazität der Batterie
- Kälteprüfstrom der Batterie

In Abbildung 6.35 und 6.36 sind zwei Ausschnitte aus einem Lastenheft zu sehen.

Lastenheft

Auslegung der Energieversorgungskomponenten Fahrzeug: „Testfahrzeug“

1. Eingangsparameter

1.1. Energienetzstruktur

Dateiname: S:\Avanti\Energienetze\Testfahrzeug\Basis.csv

1.2. Aktivierungsprofil

Dateiname: S:\Avanti\Aktivierungsprofile\Winter.csv

Aktivierte Komponenten:

ID	Name	Aktivierung (Zeitraum: Zustand)
001	Abblendlicht	0-1180:1
012	Nebelscheinwerfer	120-480:1
015	Sitzheizung Fahrer	0-600:5; 601-1200:2
016	Sitzheizung Beifahrer	0-600:5; 601-1200:3
017	Sitzheizung hinten links	0-1000:2
018	Sitzheizung hinten rechts	0-1200:4
019	Heckscheibenheizung	0-600:1
020	Frontscheibenheizung	0-300:1
034	Innenraumlüfter	0-1180:3

1.3. Klimaprofil

Dateiname: S:\Avanti\Klimaprofile\Sommer.xml

Startwerte:

Innentemperatur	30°C
Außentemperatur	30°C
Sonneneinstrahlung	Nicht definiert
Niederschlag	Nicht definiert
Relative Luftfeuchte	Nicht definiert

1.4. Streckenprofil

Dateiname: S:\Avanti\Strecken\NEDC.xml

Abbildung 6.35: Lastenheft (Auszug)

3. Simulationsergebnisse

3.1. Bordnetzwan­dler

Eigenschaft	Wert
Dauer-Ausgangsstrom	130A
Maximal-Ausgangsstrom	160A
Eingangsspannungsbereich	260V-450V
Ausgangsspannungsbereich	13V-14,5V Soll: 13,5V

3.2. Bordnetz­batterie

Eigenschaft	Wert
Kapazität	65Ah
Kälteprüfstrom	280A
Zyklusfestigkeit	100

Abbildung 6.36: Lastenheft (Auszug)

6.5 Auswirkungen des PWM-Scheduling auf die Bordnetzenergieversorgung (L)

In diesem Abschnitt sollen anhand von Simulationen mit der Toolkette Avanti die Auswirkungen des PWM-Scheduling auf die Spezifizierung der Energieversorgungskomponenten gezeigt werden. Als Grundlage für die Simulation wurde ein Fahrzeug der gehobenen Mittelklasse mit alternativem Antrieb verwendet. In diesem sind unterschiedliche Heizsysteme verbaut. Dazu zählen vier Sitzheizungen und die Front- und Heckscheibenheizung. Diese werden in das PWM-Scheduling eingebunden, um mögliche Auswirkungen auf die Auslegung der Energieversorgung zu belegen. Als Betriebsszenarien wurden die in Abschnitt 6.2.3 definierten Szenarien angewendet. Weiterhin wurden unterschiedliche Randbedingungen, wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, für die Batterie und die Spannungsgrenzen festgelegt. Die hier für das Auslegungsbeispiel definierte Gütefunktion bewertet einen niedrigen Ausgangsstrom des DC/DC-Wandlers höher als eine entsprechend niedrige Nennkapazität der 14 V Batterie.

Im ersten Schritt wurden die Simulationen mit vorgegebenen Parametern für den DC/DC-Wandler und die 14 V Batterie durchgeführt. Dabei wurde extra für diesen Bordnetzleistungsbedarf ein unterdimensionierter DC/DC-Wandler mit einem maximalen Ausgangsstrom von 75A und eine 14 V Batterie mit einer Nennkapazität von 55Ah eingesetzt. Die Abbildungen 6.37 bis 6.40 zeigen die dazugehörigen Bordnetzspannungen und Batterieströme sowohl ohne als auch mit PWM-Scheduling.

Am Anfang des Zyklus kommt es sowohl mit als auch ohne PWM-Scheduling zu einem Spannungseinbruch auf unter 12V. Dies ist darin begründet, dass die Heizsysteme aus Sicherheits- und Komfortgründen zuerst alle eingeschaltet werden. Erst wenn die Systeme in den Taktbetrieb übergehen, setzt das PWM-Scheduling ein, wobei deren Auswirkungen auf das Bordnetzverhalten eindeutig erkennbar werden. Es bewirkt eine deutliche Reduzierung der Spannungsschwankungen und der Batteriezyklisierung. In diesem Beispiel kann die Batteriezyklisierung mit einem PWM-Scheduling um ca. 50% im Vergleich zu einem nicht-eingesetzten PWM-Scheduling reduziert werden. Im zweiten Schritt wurde die Dimensionierung mit der Gütefunktion und unter Berücksichtigung der Randbedingungen ausgeführt. Die Toolkette ermittelte dabei für diesen Fahrzeugtyp folgende Daten für die Energieversorgungskomponenten des Bordnetzes:

1. Ohne PWM-Scheduling: 140A Ausgangsstrom des DC/DC-Wandlers und 65Ah Nennkapazität der 14 V Batterie
2. Mit PWM-Scheduling: 130A Ausgangsstrom des DC/DC-Wandlers und 65Ah Nennkapazität der 14 V Batterie

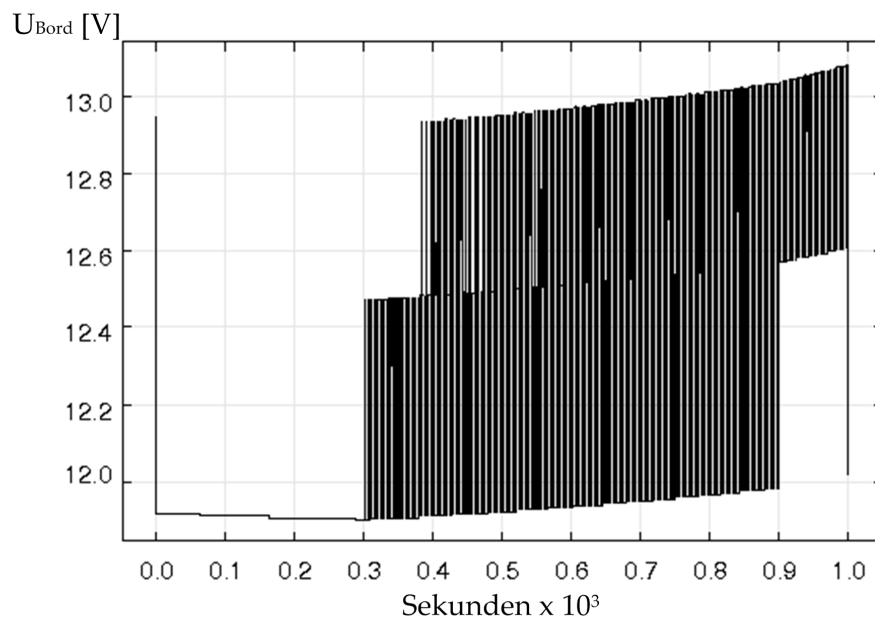


Abbildung 6.37: Bordnetzspannung ohne PWM-Scheduling

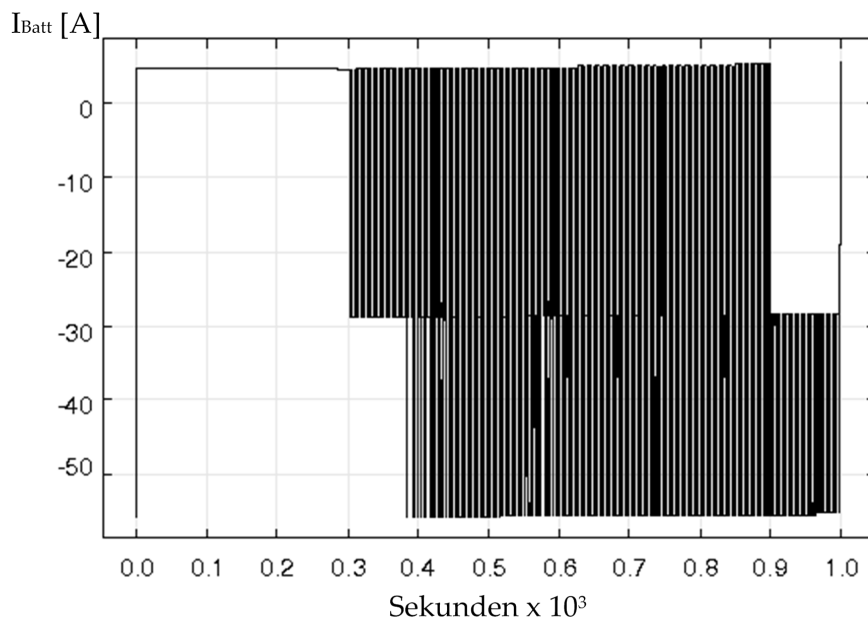


Abbildung 6.38: Batteriestrom ohne PWM-Scheduling

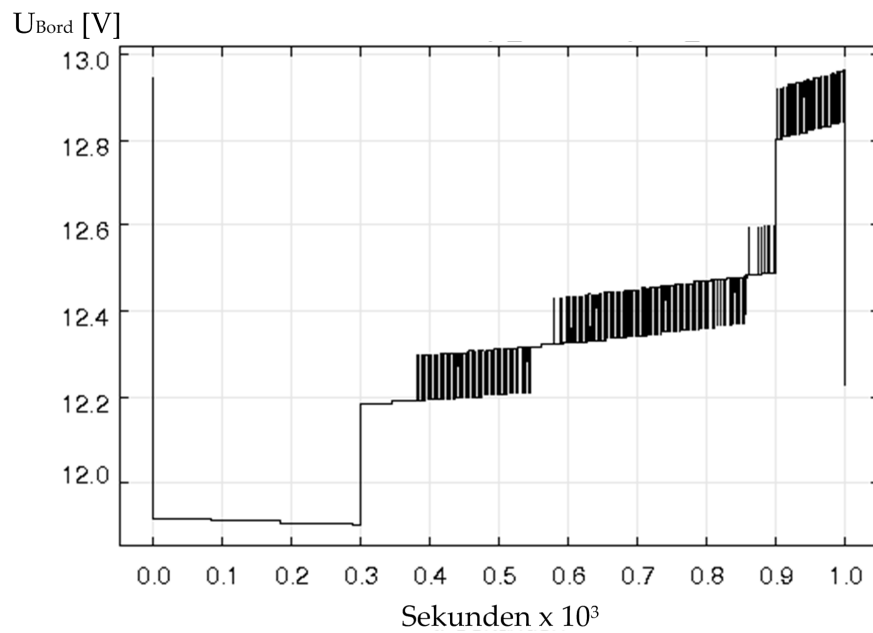


Abbildung 6.39: Bordnetzspannung mit PWM-Scheduling

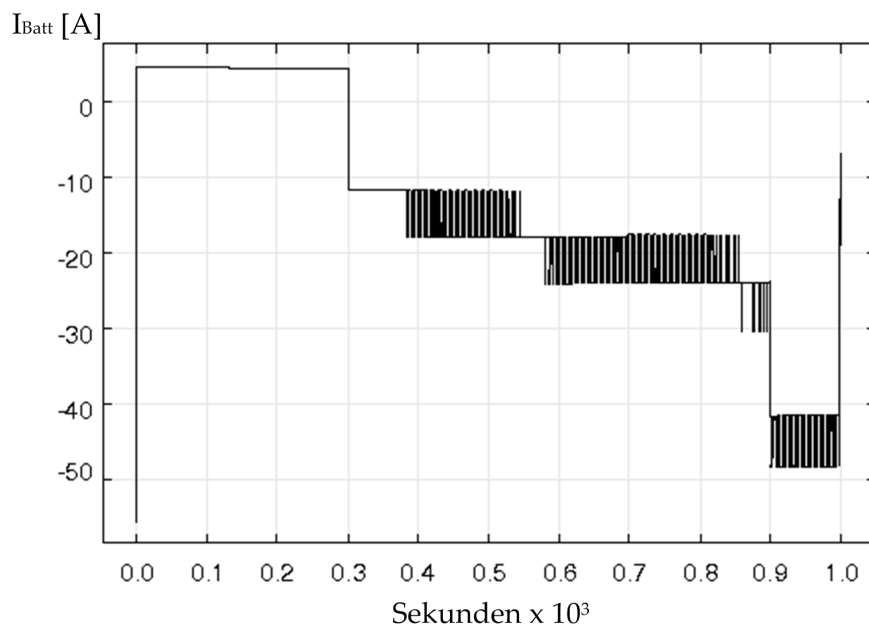


Abbildung 6.40: Batteriestrom mit PWM-Scheduling

Es zeigt sich, dass durch das PWM-Scheduling neben der Verbesserung der Bordnetzstabilität auch eine verbesserte Spezifizierung der Energieversorgungskomponenten erreicht werden kann. Eine Reduzierung der erforderlichen maximalen Ausgangsleistung kann dabei laut [26] zu einer Verringerung des Bauteilaufwandes und der Verluste im DC/DC-Wandler führen. Da zukünftig ein Anstieg PWM-gesteuerter Systeme im Automobil zu erwarten ist, werden die Auswirkungen des PWM-Scheduling noch deutlicher ausfallen als in dem hier dargestellten Beispiel. Dagegen konnte eine Verringerung der Nennkapazität bei der 14 V Batterie mittels PWM-Scheduling im Rahmen dieser Simulationen nicht erzielt werden, weil die erforderliche Mindestkapazität vorwiegend durch den Kälteprüfstrom, den Ruhestrom des Fahrzeugs und die Fahrzeugstillstandzeit bestimmt wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick (L/S)

Zukünftige PKW-Antriebe bewegen sich im Spannungsfeld internationaler Anforderungen bedingt durch politische Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Trends, die Energiewirtschaft und den Wettbewerb. Gerade die angespannte Entwicklung auf dem Rohölmarkt erfordert nachhaltige und technologische Innovationen. Für die Automobilindustrie bedeutet dies, neben der weiteren Optimierung der Aggregate- und Getriebetechnologien, alternative Antriebskonzepte zu entwickeln. Die Automobilhersteller müssen diesen Anforderungen mit einem geeigneten ganzheitlichen Energiemanagement innerhalb der Fahrzeugentwicklung begegnen. Das Energiemanagement umfasst dabei alle planenden, steuernden und vorausschauenden Maßnahmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst ein neuartiges Systemkonzept als Maßnahme des ganzheitlichen Energiemanagements für das Betriebsverhalten im Traktionsnetz in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben vorgestellt. Dabei handelt es sich um die Prognose von Fahrsituationen basierend auf der Erkennung von häufig gefahrenen Strecken mittels fahrzeuginterner Sensorik. Dieses Konzept wurde in Matlab/Simulink umgesetzt und verifiziert. Mit der Entwicklung eines parametrierbaren Fahrzeugmodells konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp mit Hilfe der Prognoseinformationen eine deutliche Verbesserung bei der Ausnutzung der verfügbaren Rekuperationsenergie erreicht wird. Dieses Konzept erlaubt eine kurzfristige Umsetzung als zusätzliches Softwaremodul für eine bereits auf dem Steuergerät implementierte Betriebsstrategie und stellt somit ein probates Mittel für einen effizienteren und zuverlässigeren Fahrzeugbetrieb dar. Es ist davon auszugehen, dass die Unterstützung der Betriebsstrategie durch die Nutzung von Prognoseinformationen über die Strecke und vorausliegenden Fahr- bzw. Verkehrssituationen zukünftig zunehmend an Bedeutung gewinnen wird. Die Verwendung sowohl von internen Sensordaten als auch von externen telematischen Daten wird dabei die optimale Lösung darstellen. Die Voraussetzungen hierfür sind die Schaffung einer durchgängigen Verfügbarkeit in allen Fahrzeugklassen und eine Umsetzung der Infrastruktur für Kommunikationssysteme im Nahbereich zum Datenaustausch relevanter Strecken- und Verkehrsinformationen.

Aufgrund der Integration von alternativen Antrieben und der stetigen Zunahme von elektrischen Komfort- und Sicherheitssystemen ist die Dimensionierung der Energieversorgungskomponenten für das 14 V Bordnetz im Kraftfahrzeug ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Energiemanagements. Heutige Bordnetze haben durch die Vielfalt an integrierten Funktionen in den Bereichen Antrieb, Sicherheit, Komfort und Infotainment und deren gegenseitige Vernetzung einen hohen Komplexitätsgrad erreicht. Die Bordnetzfunktionen unterliegen dabei einer Vielzahl von äußeren Einflüssen. Das Betriebsverhalten der Bordnetzkomponenten kann somit zum einen durch das Komfortverhalten der Insassen und zum anderen durch klimatische Umgebungsbedingungen sowie Fahrsituationen, -strecken und -dynamik bestimmt werden. Weiterhin erlangt das Bordnetz durch die Vielzahl der Kurzzeit-, Langzeit- und Dauerverbraucher, deren Betriebsverhalten gerade in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zum Teil von den im Traktionsnetz verbauten Komponenten abhängt, ein dynamisches Verhalten, welches durch einfache Strombilanzrechnung nicht mehr erfasst werden kann.

Um dennoch eine zuverlässige und optimale Basis für die Auslegung der Energieversorgung für das 14 V Bordnetz in Fahrzeugen sowohl mit konventionellem als auch mit alternativem Antrieb zu gewährleisten, wurde in dieser Arbeit eine allgemeine Dimensionierungsmethodik entwickelt. Diese führt ausgehend von einer Datenerfassung und Relevanzanalyse über die Modellierung und Simulation zu einer optimalen Auslegung der Energieversorgungskomponenten für das 14 V Bordnetz. Innerhalb dieser Methodik wurden Kriterien aufgestellt, um die für die Modellierung relevanten Bordnetzkomponenten auszuwählen und die entsprechenden Detaillierungsgrade zuzuordnen. Die Umsetzung der Modelle erfolgte in dieser Arbeit mit der Beschreibungssprache VHDL-AMS. VHDL-AMS ermöglicht sowohl die Modellierung auf Verhaltens- als auch auf Funktionsebene. Im Gegensatz zur Strukturmodellierung kann das Verhalten der Basismodelle vom Nutzer mathematisch beschrieben werden, wodurch die Modellierungstiefe frei wählbar ist. VHDL-AMS-Modelle haben eine sehr hohe Portabilität und Wiederverwendbarkeit, wodurch sich insbesondere in der Automobilindustrie ein deutlicher Trend in Richtung VHDL-AMS abzeichnet.

Um die Simulationsdaten des Gesamtsystems verifizieren zu können, wurde in dieser Arbeit eine umfassende Bordnetzanalyse durchgeführt. Dabei wurden die wesentlichen Einflussgrößen auf das Bordnetz wie Fahrzeugklasse, Ausstattungsgrad, Art des Antriebs und Umweltszenarien identifiziert und bewertet. Diese Messdaten dienten anschließend als Basis für die Modellierung der Bordnetzkomponenten. Die Verifizierung des Bordnetzmodells hat gezeigt, dass der mittlere Energiebedarf im Bordnetz über verschiedene Zyklen durch Simulationen basierend auf der hier erreichten Modellgüte mit einer Genauigkeit von ca. 8% ermittelt werden kann.

Durch die von den Automobilherstellern angebotenen Fahrzeugvarianten kann sich eine hohe Anzahl an Dimensionierungsszenarien für die Energieversorgung des Bordnetzes ergeben. Hieraus resultiert die Notwendigkeit, automatisierte Softwaretools innerhalb des Entwicklungsprozesses einzusetzen, die sowohl eine schnelle als auch eine zuverlässige Auslegung der Bordnetzenergieversorgung in Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben erlauben.

Basierend auf der Dimensionierungsmethodik und der VHDL-AMS-Modellbibliothek wurde daraufhin eine Toolkette bestehend aus den beiden Simulationstools Matlab/Simulink und Simplorer sowie der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software Avanti aufgebaut. Mit Hilfe dieser Toolkette und insbesondere den in Avanti implementierten Funktionen hat der Anwender die Möglichkeit, Energieversorgungskomponenten für das Bordnetz wie z. B. den Bordnetzwanandler und die Bordnetzbatterie in einem Fahrzeug mit einem alternativen Antrieb unter verschiedenen Umweltszenarien zu simulieren und optimal zu dimensionieren. Das Tool Avanti ist modular aufgebaut und kann daher leicht um zusätzliche Funktionalitäten erweitert werden. So wäre es unter anderem möglich, in dem Dimensionierungsprozess die Topologie des Energienetzes einzubeziehen und dadurch die optimalen Leitungslängen und Leiterquerschnitte festzulegen. Weiterhin können mit Hilfe geeigneter Modelle auch Aussagen über das EMV-Verhalten im Bordnetz getroffen werden. Außerdem können in dieser Toolkette Steuerungsalgorithmen berücksichtigt werden, die eine Reduzierung der „worst-case“-Situationen für die Energieversorgung gewährleisten, falls die Energieversorgungskomponenten nicht auf den maximalen Leistungsbedarf des Bordnetzes aufgrund von Bauraum- oder Gewichtsrestriktionen ausgelegt werden können.

Heutzutage werden im Kraftfahrzeug unterschiedliche Aktoren zur Leistungsregulierung pulswidenmoduliert angesteuert. Dadurch kann es aufgrund des sternförmigen Leitungsnetzes im Bordnetz zu einer Aufsummierung von Strömen zu bestimmten Zeitpunkten an den Lastverteilungspunkten kommen. Gerade Heizsysteme können dabei einen hohen Leistungsbedarf von über 1 kW im Bordnetz erfordern. Eine Reduzierung dieser Stromspitzen kann neben einer verbesserten Bordnetzstabilität zu einer optimalen Dimensionierung der Bordnetzenergieversorgung führen.

In dieser Arbeit wurde zur Reduzierung der im Bordnetz auftretenden Spitzenströme ein Steuerungsalgorithmus, das PWM-Scheduling, entworfen und umgesetzt. Dabei werden die PWM-Steuersignale von mehreren Bordnetznetzkomponenten zeitlich gegeneinander verschoben. Dadurch wird die gleichzeitige Aktivierung der Komponenten vermindert und die resultierenden Gesamtströme reduziert. Weiterhin wird durch das PWM-Scheduling sichergestellt, dass das für die jeweiligen Komponenten geforderte Tastverhältnis eingehalten wird. Dadurch wird die notwendige mittlere Leistungsaufnahme der Komponente und somit die erforderliche Funktion gewährleistet. Der Algorithmus für diese Funktion wurde in Matlab/Simulink implemen-

tiert und getestet. Anschließend konnte seine Funktion auch an einem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Labormuster gezeigt werden.

Mit Hilfe der beschriebenen Toolkette konnte nachgewiesen werden, dass sich durch das PWM-Scheduling Verbesserungen bei der Auslegung der Energieversorgungskomponenten und bei der Bordnetzstabilität ergeben. Neben der Reduzierung der Maximalströme, die z. B. eine kleinere Auslegung des Bordnetzwandlers in Fahrzeugen mit alternativem Antrieb ermöglicht, bewirkt das PWM-Scheduling auch eine Stabilisierung der Bordnetzspannung und eine Verringerung der Batteriezyklisierung. Die Ausschöpfung des gesamten Potenzials dieser Toolkette einschließlich des Steuerungsalgorithmus überschreitet die Möglichkeiten dieser Dissertation und bleibt den nachfolgenden Anwendern überlassen.

Literaturverzeichnis

- [1] Hybridautos sind eine ökologische Katastrophe. In: *Braunschweiger Zeitung* 24. Januar (2004)
- [2] Mobilität in Deutschland 2002 - Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten / Bundesministerium für Verkehr. 2004. – Forschungsbericht
- [3] ADAC: *Entwicklung der Durchschnittspreise für Kraftstoffe in Deutschland*. http://www.adac.de/auto_motorrad/Tanken/Kraftstoffmarkt/Die_Entwicklung_der_jaehrlichen_Durchschnittspreise_fuer_Kraftstoffe/default.asp. – abgerufen am 06.09.2006
- [4] ALLGEIER, T. ; KLENK, M. ; LANDENFELD, T.: Vergleich von Kraftstoff-Fahrzeug-Systemen: Umwelt- und Kostenanalyse. In: VDI (Hrsg.): *Innovative Fahrzeugantriebe*, 2002
- [5] AMMERMAN, Dipl.-Ing. D.: *Organische Leuchtdioden*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1997 (Reihe 9: Elektronik 253). – Dissertation. – ISBN 3–18–325309–7
- [6] BARGENDE (Hrsg.) ; REUSS (Hrsg.) ; WIEDEMANN (Hrsg.): *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren*. expert verlag, 2005
- [7] BAUSIERE, R. ; LABRIQUE, F. ; SEGUIR, G.: *Power Electronic Converters*. Berlin : Springer Verlag, 1993. – ISBN 3–540–54760–6
- [8] BESCH, Christiane: *Bordnetzverbrauchsmessungen im Fahrzeug mit alternativem Antrieb*, Technische Universität Braunschweig, Praktikumsbericht, 2001. – Praktikum bei der Volkswagen AG
- [9] BÄKER, Dipl.-Ing. B.: *Energie- und Informationsmanagement für zukünftige Kfz-Bordnetze*. Aachen : Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1998 (Berichte aus dem Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik 4). – Dissertation. – ISBN 3–89653–241–3
- [10] BOHNER, M.: *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*. 27. Auflage. Haan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel, 2001
- [11] BOSCH (Hrsg.): *Autoelektrik Autoelektronik*. Vieweg Verlag, 2002
- [12] BOSCH (Hrsg.): *Kraftfahrzeugtechnisches Taschenbuch*. Vieweg Verlag, 2002

- [13] BOSSE, Dipl.-Ing. R.: *Reduzierung von Emissionen durch Triebstrangmanagement an einem Dieselfahrzeug*. Aachen : Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1999 (Berichte aus dem Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik 5). – Dissertation. – ISBN 3–89653–465–3
- [14] BOSSEL, Hartmut: *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Ein Lehr- und Arbeitsbuch mit Simulations-Software*. Vieweg, 1992
- [15] BRAESS, Hans-Hermann ; SEIFFERT, Ulrich: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg, 2005
- [16] BRYCHTA, Peter ; MÜLLER, Hans: *Technische Simulation*. Vogel, 2004. – ISBN 3–8023–1971–0
- [17] BUSCHHAUS, W.: *Entwicklung eines leistungsorientierten Hybridantriebs mit voll-automatischer Betriebsstrategie*, RWTH Aachen, Diss., 1994
- [18] CERBE, Günther ; HOFFMANN, Hans-Joachim: *Einführung in die Thermodynamik*. 11. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 1996. – ISBN 3–446–18849–5
- [19] CHEVALIER, M. ; MEINHEIT, H.: Vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride Antriebssysteme. In: SCHÖLLMANN, M. (Hrsg.) ; MITAUTOREN, 26 (Hrsg.): *Energiemanagement und Bordnetze*, expert verlag, 2005
- [20] CONRAD, Mirko. *Automotive Software Engineering*. www2.informatik.hu-berlin.de/~hs/Lehre/2005-WS_SWE2/. 2005
- [21] DAUENSTEINER, A. (Hrsg.): *Der Weg zum Ein-Liter-Auto*. Springer Verlag, 2002
- [22] FALK, Andreas ; WACHENFELD, Volker: DC/DC-Wandler: Schnittstelle zwischen Batterie und Antrieb. In: VOSS, Burghard (Hrsg.) ; MITAUTOREN, 53 (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge*, expert verlag, 2005
- [23] FETZER ; LEDERER ; WERNICKE ; AMSLER: Virtuelles Design von Kfz-Elektronik-Netzwerken. In: *Automotive Electronics 1/2004, Sonderausgabe von ATZ, MTZ und Automotive Engineering Partners* (2004), S. 8–13
- [24] FISCHER, G. ; GÖTZ, G. ; MICHAEL, J.: Anforderungen an die Auslegung von Hybridantrieben. In: VDI (Hrsg.): *Hybridantriebe*. Düsseldorf, 1999
- [25] FREY, Bernd ; HÄFFNER, Jürgen: Batteriesensorik and Batteriezustandserkennung. In: MATTHIAS SCHÖLLMANN UND 26 MITAUTOREN (Hrsg.): *Energiemanagement und Bordnetze*, expert verlag, 2005
- [26] GARCIA: *DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen und Superkondensatoren*, ETH Zürich, Diss., 2002

- [27] GENTNER, Thomas: *Multi-Level-Modellierung mit formaler Beobachtung und Bewertung von Modulen eines Testsystems für integrierte Schaltungen*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2005 (Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren 397). – Dissertation. – ISBN 3–18–339720–X
- [28] GERL, B.: *Innovative Automobilantriebe – Konzepte auf Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen*. Landsberg/Lech : Verlag Moderne Industrie, 2002
- [29] GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge und Energiemanagement*. 2004 . – ISBN 3–937655–00–X
- [30] GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge und Energiemanagement*. 2006
- [31] GRAF, H.-M.: Offene Softwarelösung für das Energiemanagement. In: *ATZ* 1 (2004)
- [32] GREIN, F.G. ; WEIDEMANN, J.: Vorausschauende Fahrstrategien für verbrauchssenkende Fahrerassistenzsysteme. In: *VDI Berichte 1565*, VDI Verlag, 2000
- [33] GSCHIEDLE, Rolf: *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik. (Lernmaterialien)*. Europa-Lehrmittel, 2004
- [34] HARTMANN, A.: *Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Fahrstreckenerkennung und Prognose des Geschwindigkeitsprofils eines Fahrzeugs*, Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, TU Braunschweig, Diplomarbeit, 2006
- [35] HARTMANN, Dr.-Ing. Hans-Dieter: *Das 42-V-Bordnetz für Kraftfahrzeuge - Motivation und Innovation / sci-worx GmbH*. Hannover, Oktober 2002. – Forschungsbericht
- [36] HENNEBERGER, G. (Hrsg.): *Elektrische Motorausrüstung*. Vieweg Verlag, 1990
- [37] HESSEL, Ewald: Behavioural Model of a DCDC Converter written in VHDL-AMS. In: *SYNOPSISYS User Group Saber*. Munich, October, 8th 2002
- [38] HOROWITZ, Paul (Hrsg.) ; HILL, Winfield (Hrsg.): *Die hohe Schule der Elektronik*. Elektor, 1996
- [39] HUCHO, Wolf-Heinrich (Hrsg.): *Aerodynamik des Automobils*. Springer Verlag, 1999
- [40] HUTTER, Kolumban: *Fluid- und Thermodynamik*. Zweite Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2003. – ISBN 3–540–59235–0

- [41] IMBODEN, Dieter M. ; KOCH, Sabine: *Systemanalyse*. Berlin : Springer Verlag, 2003. – ISBN 3-540-43935-8
- [42] KAYSER, Dipl.-Ing. A.: *Komponentenorientierte Modellierung elektrischer und mechatronischer Systeme*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2003 (Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren 368). – Dissertation. – ISBN 3-18-336820-X
- [43] KLEIMAIER, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*, TU München, Diss., 2003
- [44] KÜMPERS, Jörg ; SCHMITZ, Claus: Nickel-Metallhydrid-Batterien für Hybridfahrzeuganwendungen. In: BURGHARD VOSS UND 53 MITAUTOREN (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge*, expert verlag, 2005
- [45] KNORR, Dr. U.: Drei Fliegen mit einer Klappe / Elektronik Automotive. 2003. – Forschungsbericht
- [46] KRÜGER, Manfred (Hrsg.): *Grundlagen der Kraftfahrzeugelektronik*. Hanser Verlag, 2004
- [47] KÖTZ, R.: Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. In: ISET (Hrsg.): *Energiespeicher und Energietransport: Siebentes Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik - Erneuerbare Energien und Rationelle Energieverwendung*. Kassel, 2002
- [48] KUBE, R. ; BÖCKL, M.: Energy Management Strategies for Hybrid Drive Train Systems Using Infrastructure Information. In: *Energy Management Today and Tomorrow*, ika Aachen, 2004
- [49] KUSSMANN, Dipl.-Ing. I.: *Verfahren zur Untersuchung und Berechnung des wasserseitigen Kühlkreislaufes konventioneller Motorkühlsysteme*. Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, 2001 (SAM Forschungsberichte 4). – Dissertation. – ISBN 3-925178-66-X
- [50] KURZWEIL, Peter: *Brennstoffzellentechnik*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2003. – ISBN 3-528-03965-5
- [51] LANGE, Prof. Dr.-Ing. K. (Hrsg.) ; LÖCHERER, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz (Hrsg.): *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Bd. 1-3. Vierte Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1986. – Gesamtaufnahme der drei Bände. Nur die Teilbände besitzen eine ISBN.
- [52] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Fahrstreckenerkennung zur Prognose des Energiebedarfs in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In: *Hybridantrieb - die Zukunft des Automobilantriebs?* Berlin, 2005

- [53] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Dimensioning of the Electrical Power Supply in Vehicles with Regular and Alternative Drives. In: *SAE World Congress 2006*. Detroit, 2006
- [54] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Energiemanagement in Fahrzeugen mit zukünftigen Antrieben. In: *IAD Kolloquium*. Dresden, 2006
- [55] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Prognose als Basis für die Betriebsstrategie in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In: *Innovative Fahrzeugantriebe*. Dresden, 2006
- [56] LÜBKE, Andreas: Car to Car Communication - Technologische Herausforderungen. In: *Fachtagsungsbericht GMM*, VDE-Verlag, 2004
- [57] LÜCK, P. ; LEHNA, M.: Alternative Hybrid-Antriebssysteme in der Forschung und Entwicklung. In: *TAE Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge*, 2004
- [58] LIEBL, Johannes: Die Automobilindustrie im Spannungsfeld von Gesetzgebung und Kundenerwartungen. In: *DPG-Tagung, München, 20.03.2006* BMW Group, 2006
- [59] LOTT, Dipl.-Ing. J.: *Einsatz des Doppelschichtkondensators als Zusatzspeicher im Elektrofahrzeug*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001 (Reihe 21: Elektrotechnik 307). – Dissertation. – ISBN 3-18-330721-9
- [60] The MathWorks (Veranst.): *International Automotive Conference 2004*. Aachen : Shaker Verlag, 2004 . – ISBN 3-8322-2872-1
- [61] MEYER, Dipl.-Ing. T.: *DC/DC-Wandler mit kleiner Eingangsspannung für photo-voltaische, elektrochemische und thermoelektrische Zellen*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2000 (Reihe 21: Elektrotechnik 288). – Dissertation. – ISBN 3-18-328821-4
- [62] MITSCHKE, Manfred (Hrsg.): *Dynamik der Kraftfahrzeuge: Antrieb und Bremsung*. Springer Verlag, 1995
- [63] NAUMANN, Rolf: Spannungs-, strom- und impedanzbasierte Methoden der Batteriediagnose: Möglichkeiten und Grenzen. In: MATTHIAS SCHÖLLMANN UND 26 MITAUTOREN (Hrsg.): *Energiemanagement und Bordnetze*, expert verlag, 2005
- [64] NEUNZIG, D. ; BENMIMOUN, A.: Potenziale der vorausschauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. In: *11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2002

- [65] NITZKE, Dipl.-Ing. Hans-Georg ; REBOHL, Dipl.-Ing. T.: *Simulation und Realisierung von Abgasrückführungskonzepten für Dieselmotoren*. Aachen : Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 2000 (Berichte aus dem Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik 9). – Dissertation. – ISBN 3–89653–670–23
- [66] PAPAGEORGIOU, M. (Hrsg.): *Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. Oldenbourg Verlag, 1991
- [67] PASCHE, Sven: *Umsetzung und Verifizierung eines Energiemanagement-Algorithmus in Matlab/Simulink*, Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, TU Braunschweig, Diplomarbeit, 2005
- [68] PEHNT, Dipl.-Phys. M.: *Energierévolution Brennstoffzelle?* Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH, 2002. – ISBN 3–527–30511–4
- [69] PEHNT, Dipl.-Phys. M.: *Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2002 (Reihe 6: Energietechnik 476). – Dissertation. – ISBN 3–18–347606–1
- [70] PEIER, Dirk (Hrsg.) ; HIRSCH, Holger (Hrsg.): *ECT Electronics & Communications in Traffic Systems*. Hüthig, 2002
- [71] PFITZNER, Mirko ; WÖHR, Adrian: *Modellierung und Simulation von Mixed-Signal-Systemen mit VHDL-AMS*, Fachhochschule Esslingen, Fachbereich Informationstechnik, Studienarbeit, Jahr unbekannt
- [72] RAMESOHL, I. ; GERLING, D. ; RÖDDER, D.: Elektrische Kfz-Hilfsantriebe: Aktuelle Trends und Herausforderungen. In: *3. Tagung Mechatronik im Automobil*, 2001
- [73] ROSENMAYR, Marc ; SCHÖLLMANN, Matthias: Batteriediagnose mit dem intelligenten Batteriesensor IBS. In: MATTHIAS SCHÖLLMANN UND 26 MITAUTOREN (Hrsg.): *Energiemanagement und Bordnetze*, expert verlag, 2005
- [74] ROTHER, Franz: Mit Doppelherz. In: *Wirtschaftswoche* 29 (2006), S. 68–75
- [75] SAMPER, K. ; KUHN, K.-P.: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem. In: *VDI Berichte 1613*, VDI Verlag, 2001
- [76] SCHIMANSKI, Michell ; LANGE, Stephan ; VARCHMIN, J.-Uwe: Modellbildung als Bestandteil eines ganzheitlichen Energiemanagements. In: *14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, 2005
- [77] SCHIMANSKI, Michell ; LANGE, Stephan ; VARCHMIN, J.-Uwe ; PLIKAT, Robert: Dimensioning of the Electrical Power Supply using Modeling and Simulation. In: *FEEDS Workshop*. Hannover, 2006

- [78] SCHLIENZ, Ulrich (Hrsg.): *Schaltnetzteile und ihre Peripherie*. Vieweg Verlag, 2001
- [79] SCHÄUFFELE, Jörg (Hrsg.) ; ZURAWKA, Thomas (Hrsg.): *Automotive Software Engineering*. Vieweg Verlag, 2003
- [80] SIEVERS, Klaus: Hybrid-Autos haben Zukunft. In: *Braunschweiger Zeitung* 5. Februar (2004), S. 8
- [81] SIEVERS, Klaus: Auto der Zukunft fährt mit Wasserstoff. In: *Braunschweiger Zeitung* 28. August (2005), S. 10
- [82] STAN, Cornel: *Thermodynamik des Kraftfahrzeugs*. Berlin : Springer Verlag, 2004. – ISBN 3-540-40611-5
- [83] STAN, Cornel (Hrsg.): *Alternative Antriebe für Automobile*. Springer Verlag, 2005
- [84] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verbraucherpreisindex und Index der Einzelhandelspreise - Jahresdurchschnitte ab 1948*. http://www.destatis.de/download/d/preis/jahr_ab_1948.pdf. – abgerufen am 06.09.2006
- [85] STEINER, Dipl.-Ing. T.: *Flüssigkeitskühlung von Leistungshalbleitermodulen*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2000 (Reihe 21: Elektrotechnik 289). – Dissertation. – ISBN 3-18-328921-0
- [86] STÖLTING, Hans-Dieter (Hrsg.) ; KALLENBACH, Eberhard (Hrsg.): *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. Hanser Verlag, 2002
- [87] THIEL, Udo L. (Hrsg.): *Schaltnetzteile*. Franzis', 1998
- [88] TIETZE, U. ; SCHENK, Ch.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 12. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2002. – ISBN 3-540-42849-6
- [89] Toyota: *PRIUS Preise, Ausstattungen & technische Details*. 2004. – Informationsbroschüre
- [90] VARCHMIN, J.-Uwe ; LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell: *Energiemanagement - Herausforderungen für künftige Kraftfahrzeuge*. In: *Euroforum-Fachtag Energiemanagement*. München, 2005
- [91] VDI: *Hybridsysteme - ökologisch notwendig und ökonomisch sinnvoll*. In: *VDI nachrichten* 43 (2004), S. 18
- [92] VDI: *Limousinen mit Hybridantrieb fahren aus der Nische*. In: *VDI nachrichten* 4 (2004), S. 12
- [93] VDI: *Moderne Diesel- und Hybridantriebe haben die Nase vorn*. In: *VDI nachrichten* 42 (2004), S. 9
- [94] VDI: *Toyota Prius belebt Hybrid-Diskussion*. In: *VDI nachrichten* 7 (2004), S. 13

- [95] VDI: Hybrid hat kleinen Markt in Europa. In: *VDI nachrichten* 43 (2005), S. 10
- [96] VDI: Energie zurückgewinnen mit Hybridtechnik. In: *VDI nachrichten* 9 (2006), S. 8
- [97] VDI: Es wimmelt von Zielkonflikten. In: *VDI nachrichten* 32 (2006), S. 2
- [98] VDI: Hybridautos sparen im Stadtverkehr. In: *VDI nachrichten* 28 (2006), S. 7
- [99] VDI: Ottomotor brilliert mit dieseltypischen Attributen. In: *VDI nachrichten* 18 (2006), S. 14
- [100] VISTAVERDE. *Hybrid-Antriebe sind eine ökologische Katastrophe*. http://www.vistaverde.de/news/Wirtschaft/0401/21_hybrid.htm. 2004
- [101] VOORT, M. van d.: *Design and evaluation of a new fuel-efficiency support tool*, University Twente Netherlands, Diss., 2001
- [102] WALLENTOWITZ, H.: Strukturvarianten von Hybridantrieben. In: VDI (Hrsg.): *Hybridantriebe*. Düsseldorf, 1999
- [103] WEIMER, Jürgen: Der Sachs DynaStart: Technologie für zukünftige Fahrzeug-Generationen. In: HEINZ SCHÄFER UND 32 MITAUTOREN (Hrsg.): *Integrierter Starter-Generator (ISG)*, expert verlag, 2001
- [104] WIKIPEDIA. *Association des Constructeurs Europeens d'Automobiles*. <http://de.wikipedia.org/wiki/ACEA>
- [105] WIKIPEDIA. *CSV-Datei*. <http://de.wikipedia.org/wiki/CSV-Datei>
- [106] WIKIPEDIA. *Dynamic Link Library*. http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Link_Library
- [107] WIKIPEDIA. *Extensible Markup Language*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Xml>
- [108] WIKIPEDIA. *Global Positioning System*. http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [109] WIKIPEDIA. *Java (Programmiersprache)*. http://de.wikipedia.org/wiki/Java_%28Programmiersprache%29
- [110] WIKIPEDIA. *National Marine Electronics Association*. <http://de.wikipedia.org/wiki/NMEA>
- [111] WIKIPEDIA. *SPICE (Software)*. http://de.wikipedia.org/wiki/SPICE_%28Software%29
- [112] WIKIPEDIA. *Verband der Automobilindustrie*. http://de.wikipedia.org/wiki/Verband_der_Automobilindustrie

- [113] WIKIPEDIA. *Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*. http://de.wikipedia.org/wiki/Very_High_Speed_Integrated_Circuit_Hardware_Description_Language
- [114] WITTLER, Dipl.-Ing. G.: *Integrative Modellierung von Gestalt und dynamischem Verhalten beim Entwurf mechatronischer Systeme*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2003 (Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren 370). – Dissertation. – ISBN 3-18-337020-4
- [115] ZSW (Veranst.): *Elektrochemische Speicher in regenerativen Energiesystemen*. Universitätsverlag Ulm, 1993 . – ISBN 3-927402-97-4
- [116] ZSW (Veranst.): *9th Ulm ElectroChemical Talks*. Ulm : ZSW, 2004

Veröffentlichungen

- [1] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Fahrstreckenerkennung zur Prognose des Energiebedarfs in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In: *Hybridantrieb - die Zukunft des Automobilantriebs?* Berlin, 2005
- [2] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Dimensioning of the Electrical Power Supply in Vehicles with Regular and Alternative Drives. In: *SAE World Congress 2006*. Detroit, 2006
- [3] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Energiemanagement in Fahrzeugen mit zukünftigen Antrieben. In: *IAD Kolloquium*. Dresden, 2006
- [4] LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell ; VARCHMIN, J.-Uwe: Prognose als Basis für die Betriebsstrategie in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In: *Innovative Fahrzeugantriebe*. Dresden, 2006
- [5] SCHIMANSKI, Michell ; LANGE, Stephan ; VARCHMIN, J.-Uwe: Modellbildung als Bestandteil eines ganzheitlichen Energiemanagements. In: *14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, 2005
- [6] SCHIMANSKI, Michell ; LANGE, Stephan ; VARCHMIN, J.-Uwe ; PLIKAT, Robert: Dimensioning of the Electrical Power Supply using Modeling and Simulation. In: *FEEDS Workshop*. Hannover, 2006
- [7] VARCHMIN, J.-Uwe ; LANGE, Stephan ; SCHIMANSKI, Michell: Energiemanagement - Herausforderungen für künftige Kraftfahrzeuge. In: *Euroforum-Fachtag Energiemanagement*. München, 2005

Lebenslauf Stephan Lange

Persönliche Daten

Stephan Lange

Geboren am 09.06.1975 in Gifhorn

ledig

Schulbildung

1981–1985 Grundschule Sassenburg

1985–1987 Orientierungsstufe Weyhausen

1987–1995 Humboldt-Gymnasium Gifhorn

Wehrdienst

1995–1996 Kampfmittelbeseitigungsanlage Munster

Berufliche Ausbildung

1996–1999 Ausbildung zum Energieanlagenelektroniker bei der Volkswagen Coaching GmbH

Hochschulausbildung

1999–2003 Studium der Elektrotechnik an der TU Braunschweig
Schwerpunkt: Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik

Berufliche Tätigkeit

2003-2006 Projektingenieur bei der WiTech Engineering GmbH in Braunschweig und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik an der TU Braunschweig

seit Oktober 2006 Projektleiter für Komfortelektronik bei der Volkswagen AG im Bereich Elektrik-/Elektronik-Entwicklung

Lebenslauf Michell Schimanski

Persönliche Daten

Michell Schimanski

Geboren am 14.03.1978 in Bremerhaven

ledig

Schulbildung

1984–1988	Grundschule Loxstedt
1988–1990	Orientierungsstufe Loxstedt
1990–1994	Gymnasium Loxstedt
1994–1997	Gymnasium Wesermünde

Ersatzdienst

1997–1998	Zivildienst
-----------	-------------

Hochschulausbildung

1998–2003	Studium der Elektrotechnik an der TU Braunschweig Schwerpunkt: Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik
-----------	---

Berufliche Tätigkeit

2003-2006	Projektingenieur bei der WiTech Engineering GmbH in Braunschweig und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik an der TU Braunschweig
seit Oktober 2006	Projektingenieur bei Baker Hughes INTEQ in Celle im Bereich Systems Integration